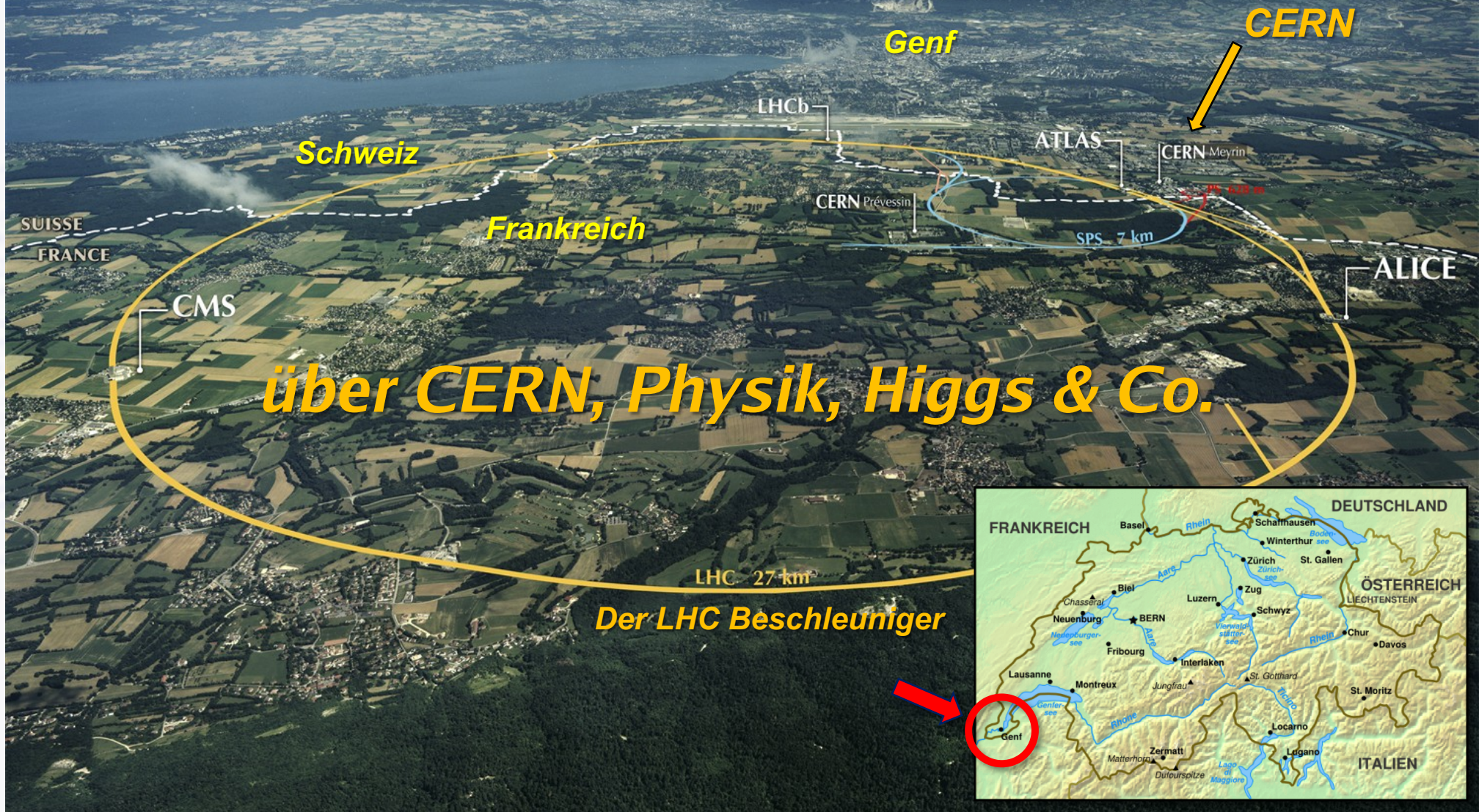


# CERN

**Das europäische Forschungszentrum für Teilchenphysik**  
(Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire)





# CERN wurde 1954 gegründet: 12 europäische Länder

## “Wissenschaft für den Frieden”

Heute: 23 Mitgliedsländer (zuletzt: Serbien, 24. März 2019)

7 assoziierte Mitgliedsländer oder Beitrittskandidaten

(zuletzt: Litauen, 8. Januar 2018)

- ~ 2600 Staff (Angestellte)
- ~ 800 Fellows (Stipendiaten)
- ~ 13'500 “Benutzer” (Gastwissenschaftler)
- ~ 1000 weiteres Personal

**Mitgliedsländer:** Belgien, Bulgarien, Dänemark, **Deutschland**, Finnland, Frankreich, Griechenland, Großbritannien, Israel, Italien, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Serbien, Slowakien, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn

**Assoziierte Mitglieder in der Vorstufe zur Mitgliedschaft:**

Slowenien, Zypern

**Assoziierte Mitglieder:** Indien, Litauen, Pakistan, Türkei, Ukraine

**Beobachter:** Japan, Rußland, Vereinigte Staaten von Amerika; Europäische Kommission, Joint Institute for Nuclear Research, UNESCO

**Länder mit der Absicht auf (assoziierte) Mitgliedschaft:**

Brasilien, Estland, Irland, Kroatien, Lettland





# ***Der Beginn von CERN***

## ● **1946**

- ➔ erste Ideen zur Gründung einer internationalen (europäischen) Wissenschaftsorganisation unmittelbar nach dem 2. Weltkrieg

## ● **Dezember 1949**

- ➔ erster konkreter Vorschlag bei der UNESCO Conference in Lausanne

## ● **Dezember 1951 und Februar 1952**

- ➔ Unterzeichnung eines Regierungsabkommen bei der UNESCO zur Gründung eines vorläufigen CERN Rates

## ● **4. Oktober 1952**

- ➔ vorläufiger CERN Rat entscheidet sich für Meyrin bei Genf als Standort (andere Vorschläge: Arnheim, Kopenhagen, Paris)
  - Gelände verfügbar, bereits existierende internationale Gemeinschaft, Neutralität

## ● **29. September 1954**

- ➔ Abkommen unterzeichnet von 9/12 Ländern, **offizieller CERN-Geburtstag**



# Frühe Fotos

Sur le terrain du futur institut nucléaire

Begehung des zukünftigen  
Standorts in Meyrin  
(30. Oktober 1953)



Sous la conduite de M. A. Picot, les membres du Conseil européen pour la recherche nucléaire se sont rendus hier à Meyrin pour reconnaître le terrain où s'élèvera le Centre nucléaire (voir en Dernière heure).

(Photo Freddy Bertrand, Genève)

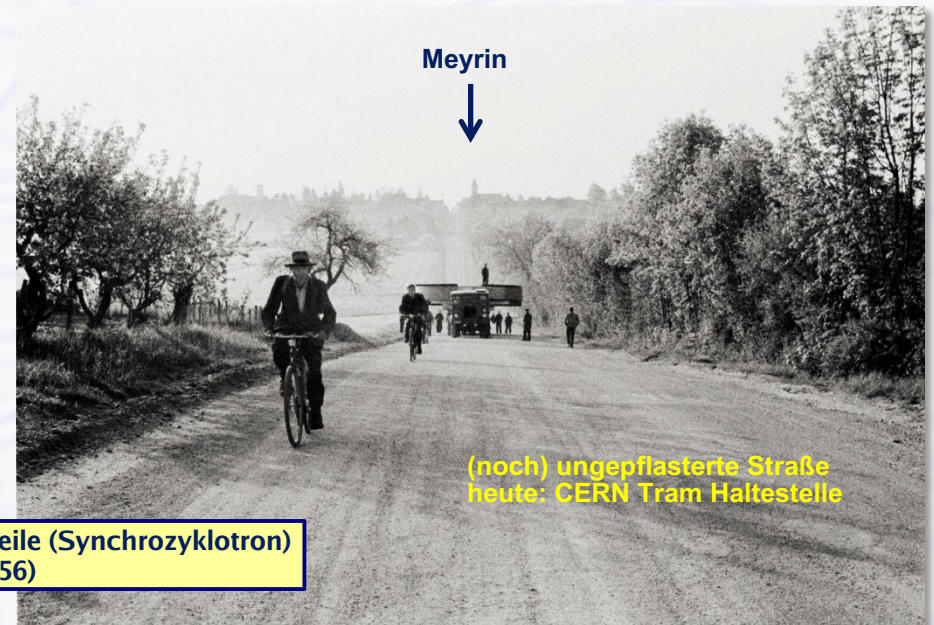
*La Suisse* du 30 octobre 1953



erste Bauarbeiten  
(17. Mai 1954)



Transport der ersten Beschleunigerteile (Synchrozyklotron)  
durch Meyrin (1956)



(noch) ungepflasterte Straße  
heute: CERN Tram Haltestelle



# CERN Gelände

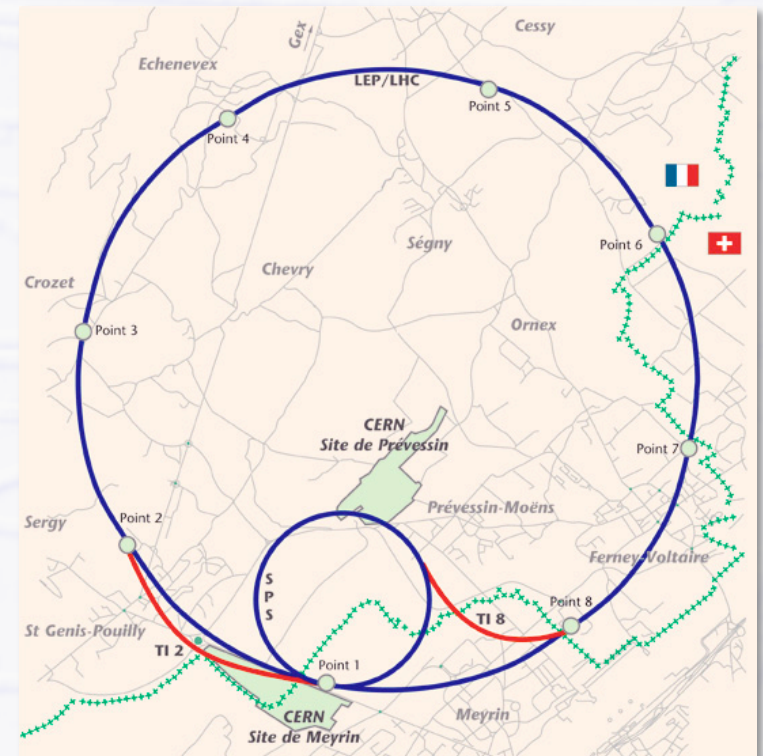
- 2 grosse Standorte

- ➔ Meyrin (Schweiz, mit Erweiterung nach Frankreich Ende 1960er Jahre)

- ➔ Preveessin (Frankreich, seit 1970er Jahre, zunächst eigenständig)

- 8 kleinere Standorte entlang des LHC Tunnels (in CH, F)

- weitere kleinere Standorte (SPS, LHC Magnehalle usw.)





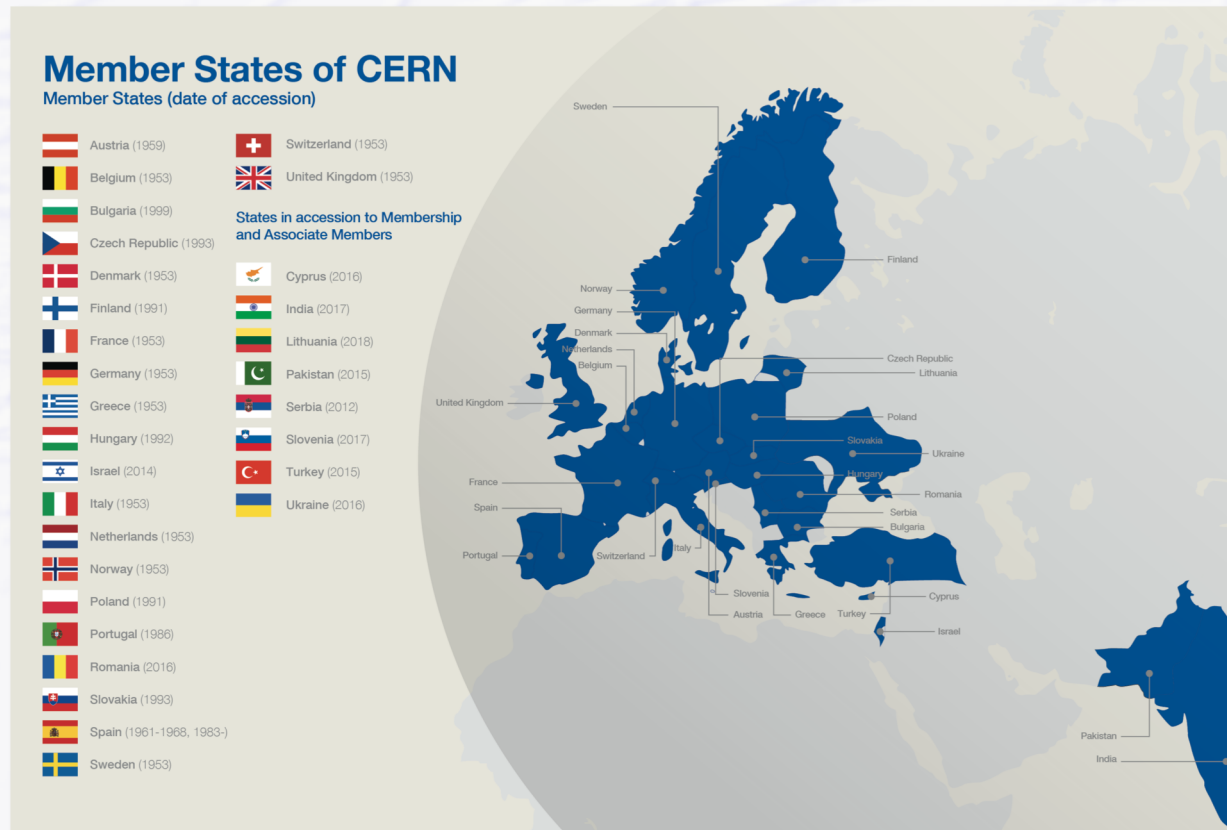
# CERN Budget 2018: 1147 MCHF

(Member States: 1123 MCHF, Associated Members: 24 MCHF)

→ umgerechnet ~1012 M€

• TU Berlin zum Vergleich:  
535.5 M€ (2017, mit Drittmitteln)  
35'000 Studenten

→ anteilig nach Bruttoinlandsprodukt  
der Mitgliedsländer



Member State	Contribution [%]
Austria	2.15
Belgium	2.71
Bulgaria	0.29
Czech Republic	0.93
Denmark	1.80
Finland	1.33
France	14.12
<b>Germany</b>	<b>20.55</b>
Greece	1.12
Hungary	0.61
Israel	1.61
Italy	10.43
Netherlands	4.61
Norway	2.71
Poland	2.82
Portugal	1.11
Romania	1.02
Slovak Republic	0.49
Spain	7.04
Sweden	2.70
Switzerland	4.02
United Kingdom	15.84



# Deutschland und CERN

- (West-)Deutschland ist einer der ersten 12 CERN Gründerstaaten (1954)

→ Werner Heisenberg (Nobelpreisträger 1932) (unterzeichnete CERN Vertragsurkunde)

- Teilchenphysik hatte immer eine hohe Bedeutung in Deutschland

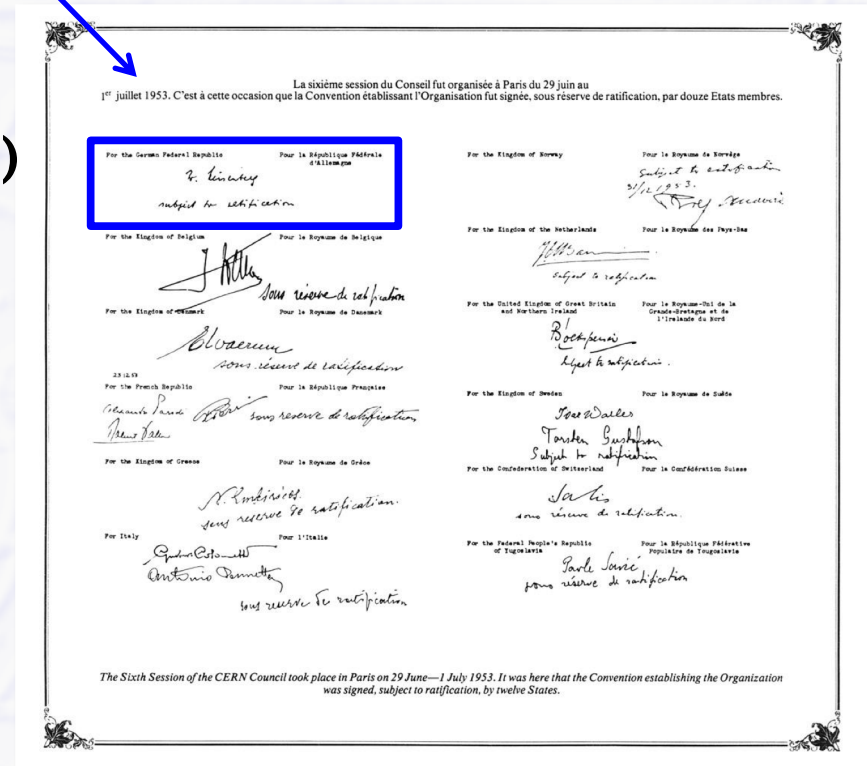
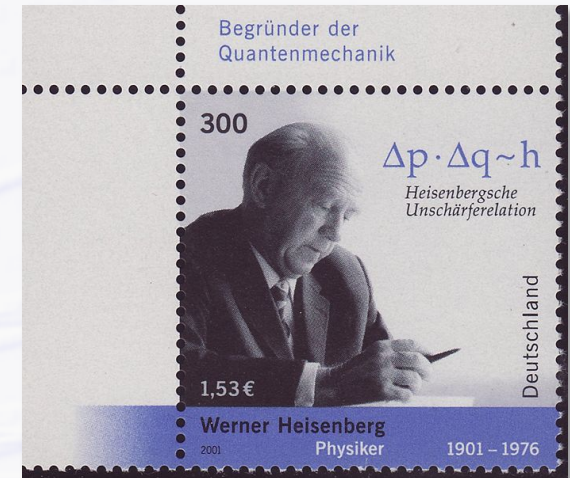
→ Nationales Labor: DESY (HH, Zeuthen)

→ Internationales Labor mit starker deutscher Beteiligung: CERN

- Zwei deutsche CERN General-Direktoren (beide vormals DESY)

→ **Herwig Schopper** (1981 – 1988)

→ **Rolf-Dieter Heuer** (2009 – 2015)





# Teilchenphysik in Deutschland

- **Universitäten und Forschungszentren in Deutschland**
  - ➔ **Universitäten mit sowohl experimenteller und theoretischer Teilchenphysik: 14**
  - ➔ **Universitäten mit entweder experimenteller oder theoretischer Teilchenphysik: 12**
  - ➔ **Forschungszentren (Standorte) ausserhalb Universitäten: 6**

**gelb:** Universität (exp. und theo.)  
**grau:** Universität (exp. oder theo. oder IT)  
**rot:** Forschungszentrum (ausserhalb Universität)

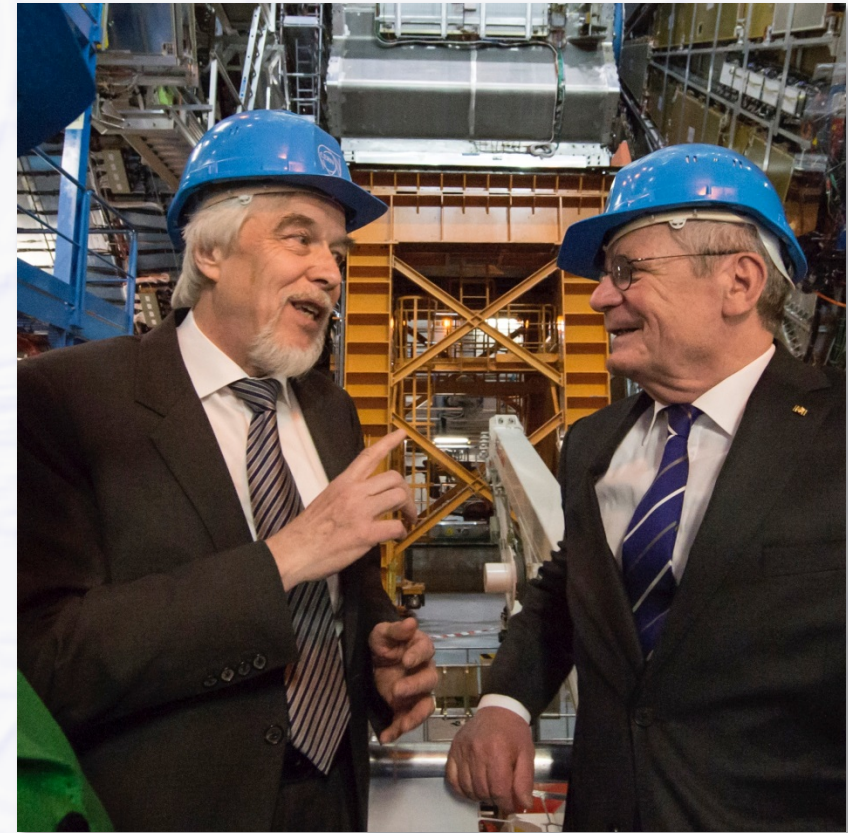




# Deutsche Prominenz am CERN



Bundeskanzlerin Angela Merkel,  
April 2008



Bundespräsident Joachim Gauck,  
April 2014

- + Ministerinnen für Bildung und Forschung (Johanna Wanka, Annette Schavan, Edelgard Bulmahn), weitere Landesminister, Staatssekretäre, Uni-Rektoren...



# CERN Organisation: Council

## CERN Council

Präsidentin: Ursula Bassler (FR, DE)

22 Mitgliedsstaaten

2 Delegierte

8 Assoziierte Mitgliedsstaaten

2 Delegierte

Ex-Officio Mitglieder

Verschiedene Beobachter auf Einladung

## Finance Committee

Vorsitzender: Ossi Malmberg (FL)

## Scientific Policy Committee

Vorsitzender: R. Keith Ellis (GB)

## Tripartite Employment Forum

Vorsitzender: Barbro Åsman (SE)

## Pension Fund Governing Board

Vorsitzender: Thomas Roth (DE, BMBF)

## Deutsche Delegierte:

Volkmar Dietz (BMBF)

Siggi Bethke (MPI für Physik, München)





# CERN Management



**Director General**

F. Gianotti

Health, Safety and Environment  
D. Forkel-Wirth

Legal Service

Internal Audit

Translation & Minutes and  
Council Support

**Accelerators and  
Technology**

F. Bordry

**Beams**

P. Collier

**Technology**

J.M. Jiménez

**Engineering**

R. Losito

**Finance and  
Human Resources**

M. Steinacher

**Finance and  
Administrative  
Processes**

F. Sonnemann

**Industry, Procurement  
and Knowledge  
Transfer**

Th. Lagrange

**Human  
Resources**

J. Purvis

**Site Management and  
Buildings**

LL. Miralles

**International  
Relations**

Ch. Warakaulle

Member States

Associate and non-Member  
States

International Organisations

Other Stakeholders

Education, Communication,  
Outreach

**Research and  
Computing**

E. Elsen

**Experimental  
Physics**

M. Krammer

**Theoretical  
Physics**

G.F. Giudice

**Information  
Technology**

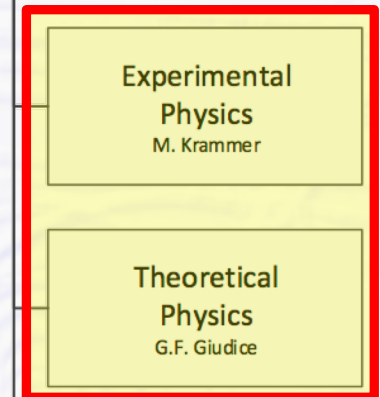
F. Hemmer

Legend

**Sector**

**Department**

**Unit**





# Aufgabenteilung im CERN

- Hauptanteil der CERN Angestellten: **Ingenieure und Techniker**
  - nur 13% Physiker
- CERN ist beides:  
**Technologielabor + wissenschaftliches Zentrum**
  - CERN Angestellte: **Technologie** (hauptsächlich)
    - Design, Bau und Betrieb grosser Beschleunigeranlagen (Infrastruktur “provider”)
  - CERN “Benutzer” aus Universitäten und anderen Forschungszentren: **Wissenschaft** (hauptsächlich)
    - Design, Bau, Betrieb der Teilchendetektoren und Physikdatenanalyse
- Teilchenkollisionspunkt ist Schnittstelle zwischen CERN Angestellten und Gastwissenschaftlern
  - Erzeugung der Kollisionen: CERN Angestellte
  - Vermessung und Analyse der Kollisionen: Gastwissenschaftler

# Distribution of All CERN Users by Nationality on 24 January 2018

**13'342 CERN "Benutzer" (Gastwissenschaftler) aus Instituten in 78 Ländern (~9.9% Deutsche) und mit 111 Nationalitäten**

## MEMBER STATES

**7889**

Austria	117
Belgium	120
Bulgaria	96
Czech Republic	244
Denmark	67
Finland	111
France	868
Germany	1342
Greece	237
Hungary	76
Israel	65
Italy	2045
Netherlands	168
Norway	67
Poland	350
Portugal	127
Romania	134
Slovakia	124
Spain	447
Sweden	85
Switzerland	228
United Kingdom	771

## OBSERVERS

**2718**

Japan	314
Russia	1187
USA	1217

## ASSOCIATE MEMBERS

India	357
Lithuania	35
Pakistan	65
Turkey	173
Ukraine	115

## ASSOCIATE MEMBERS IN THE PRE-STAGE TO MEMBERSHIP

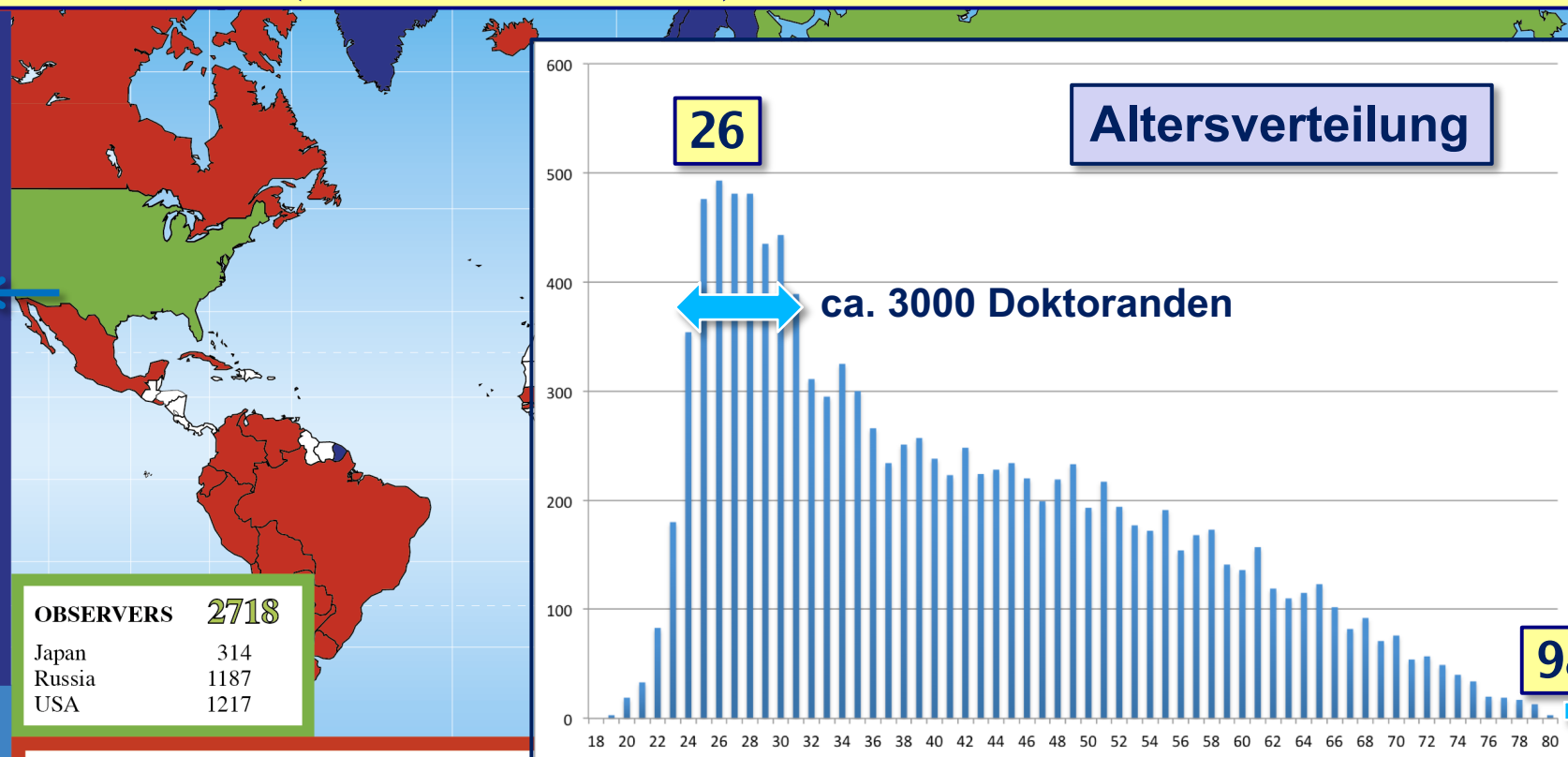
**118**

Cyprus	26
Serbia	57
Slovenia	35

## OTHERS

**1872**

Afghanistan	1	Bolivia	4	Egypt	31	Kazakhstan	5	Mongolia	2	Philippines	3	Thailand	22
Albania	3	Bosnia & Herzegovina	2	El Salvador	1	Kenya	3	Montenegro	11	Saint Kitts and Nevis	1	T.F.Y.R.O.M.	2
Algeria	14	Brazil	135	Estonia	15	Korea Rep.	185	Morocco	20	Saudi Arabia	2	Tunisia	5
Argentina	27	Burundi	1	Georgia	46	Kyrgyzstan	1	Myanmar	1	Senegal	1	Uruguay	1
Armenia	19	Cameroon	1	Ghana	1	Latvia	2	Nepal	10	Singapore	4	Uzbekistan	4
Australia	31	Canada	161	Hong Kong	1	Lebanon	23	New Zealand	5	South Africa	56	Venezuela	10
Azerbaijan	10	Chile	20	Iceland	3	Luxembourg	2	Nigeria	3	Sri Lanka	6	Viet Nam	13
Bangladesh	11	China	510	Indonesia	11	Madagascar	4	North Korea	1	Sudan	1	Zambia	1
Belarus	48	Colombia	45	Iran	51	Malaysia	15	Oman	3	Swaziland	1	Zimbabwe	2
Benin	1	Croatia	41	Iraq	1	Malta	9	Palestine (O.T.)	7	Syria	1		
		Cuba	12	Ireland	16	Mauritius	1	Paraguay	2	Taiwan	51		
		Ecuador	6	Jordan	1	Mexico	82	Peru	7				



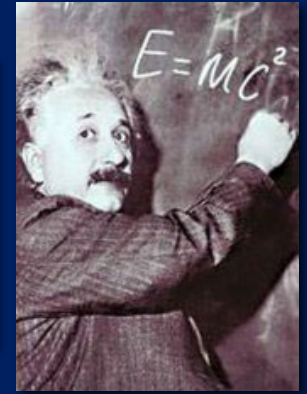




# Die Aufgaben von CERN

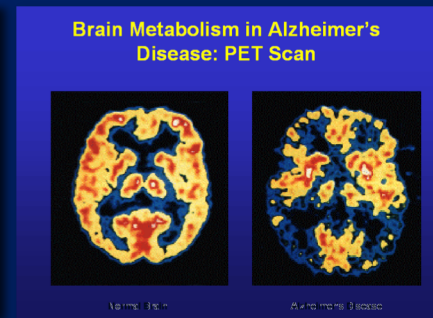
## □ **Vorantreiben** der Grenzen des Wissens

den Urknall erforschen ...wie und was war die Materie in den ersten Momenten nach dem Urknall?

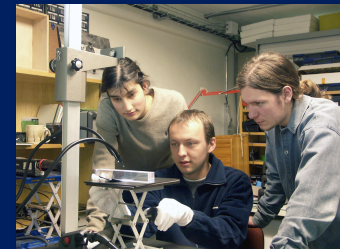


## □ **Entwicklung** neuer Techniken für Beschleuniger und Detektoren

Informationstechnologie - das Web  
Medizin - Diagnose und Therapie



## □ **Ausbildung** von Wissenschaftlern und Ingenieuren von morgen



## □ **Zusammenführen** von Menschen aus verschiedenen Ländern und Kulturen



# ***Ausbildungsprogramme am CERN***

## ● **Summer Students (2 – 3 Monate, ~350 Studenten)**

- ➔ Studierende im 3. – 4. Jahr,  
70% Physik – 30% Ingenieurwissenschaften und Informatik
- 5 Wochen Vormittags-Vorlesungen + Arbeit in einer CERN Gruppe (kleines Projekt)

## ● **Technical Students (6 – 12 Monate, ~200 Studenten)**

- ➔ Masterstudenten in technischen Bereichen
- ➔ **Sonderprogramm Baden-Württemberg** (einige FHs + KIT) und **Rheinland-Pfalz**

## ● **Doctoral Students (3 Jahre, ~220 Studenten)**

- ➔ Doktoranden mit technisch orientierten Themenbereichen
- ➔ **Deutsches Sonderprogramm (Wolfgang-Gentner-Programm)**

## ● **Fellows (2 – 3 Jahre, ~850 Fellows)**

- ➔ Junior-Fellowships: technischer Master, keine Promotion erforderlich
- ➔ Senior-Fellowships: Promotion erforderlich oder >4 Jahre nach Master



# Lehrer- und Schülerausbildung

- **High School Teachers Programme (HST)**

- 3 Wochen im Sommer, ~40-50 Teilnehmer/Jahr, auf Englisch

- **National Teacher Programmes (in Landessprache, 1 Woche)**

- 2017: 31 Kurse mit 952 Physik-Lehrern

- **S'Cool LAB**

- Experimente für Schüler

- Bau einer Nebelkammer
    - Röntgen-Röhre + Experimente
    - Supraleitung
    - Fadenstrahlrohr
    - ATLAS Magnetmodell

- 2017:

- 7240 Schüler aus 58 Ländern



# CERN's wissenschaftliche Aufgaben

## ● Beantwortung fundamentaler Fragen

### → Warum haben Teilchen Masse (sind schwer)?

- Newton konnte dies nicht erklären, aber Higgs...



Higgs  
Boson

### → Aus was besteht 96% des Universums?

- Nur 4% besteht aus Elementarteilchen, die wir kennen. Und der Rest???

### → Warum gibt es im Universum keine Antimaterie?

- Materie und Antimaterie sollte gleichermaßen nach dem Urknall entstanden sein. Es scheint nur Materie im Universum zu geben. Wo ist die Antimaterie?

### → Wie war der Zustand der Materie kurz nach dem „Urknall“?

- Wie hat sich unser Universum daraus entwickelt?

## ● Letztlichendlich: Warum gibt es uns überhaupt?



# CERN's wissenschaftliche Aufgaben

- **Grundlagenforschung** mit Elementarteilchen bei höchsten Energien (Hochenergiephysik)
  - ➔ Bau und Betrieb des weltweit grössten Teilchenbeschleunigers **LHC (Large Hadron Collider)** seit 2009
  - ➔ 27 km Tunnel, **4 (riesige) Teilchendetektoren** in unterirdischen Kavernen
  - ➔ Wissenschaftliche Ziele
    - Suche nach dem **Higgs Teilchen (GEFUNDEN!)** + präzise Vermessung der Eigenschaften
    - Suche nach **neuen Teilchen** (z.B. dunkle Materie Teilchen)
- **Weitere Forschungsgebiete (Auswahl):**
  - ➔ Antimaterie (6 Experimente am Antiprotonen “Entschleuniger” AD)
    - Unterschiede zu Materie, Spektroskopie, Anziehung im Schwerfeld
  - ➔ Proton-Struktur (COMPASS Experiment)
  - ➔ seltene Kaon Zerfälle (NA62)  $Br(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) \approx 10^{-10}$ 
    - sensitiv auf Abweichungen vom Standardmodell

# Wissenschaftliche Vielfalt am CERN

## ● ISOLDE Radioaktive Ionenstrahlen

- Grundlagenforschung an radioaktiven Isotopen
- neu: MEDICIS (Produktion radioaktiver Isotope für die Medizinforschung)

## ● nTOF (neutron Time-of-Flight Facility)

- nukleare Astrophysik + Kernphysik, Dosimetrie + Strahlungsschäden

## ● CLOUD Experiment

- Einfluß von kosmischer Strahlung auf die Wolkenbildung



## ● AMS (Alpha Magnetic Spectrometer)

- Suche nach Antimaterie in kosmischer Strahlung
- Auf der International Space Station vorletztem Space Shuttle Flug im Mai 2011
- AMS Kontrollzentrum am CERN



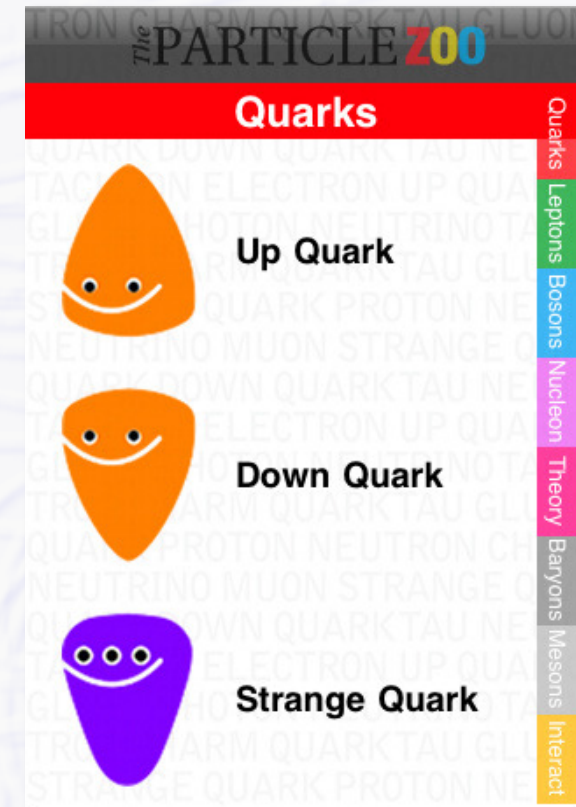
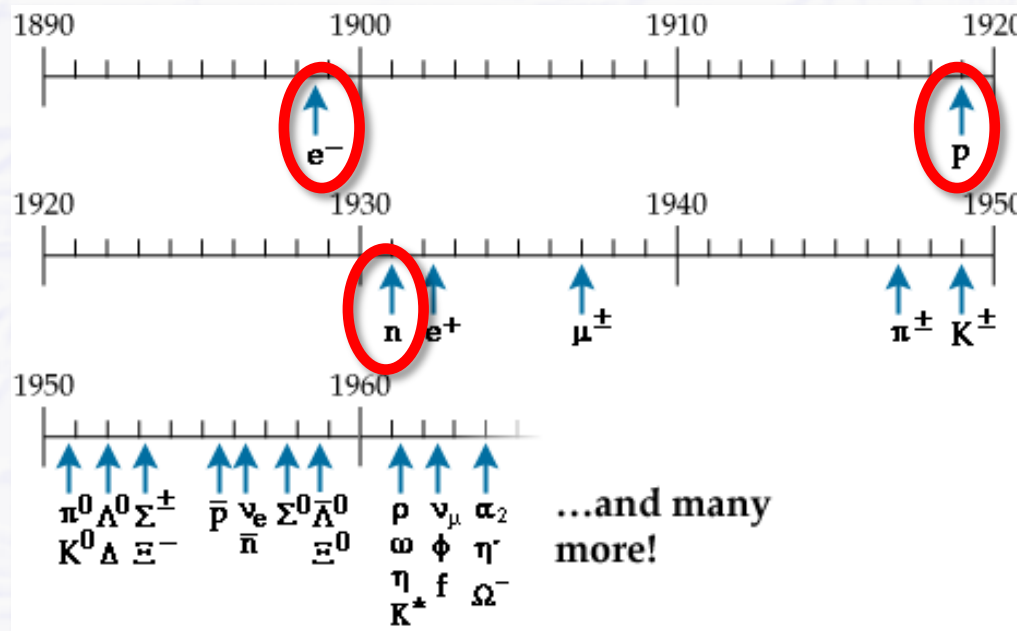


# Teilchenphysik in den 1950...60ern

- Viele neue Teilchen wurden entdeckt (**“Teilchenzoo”**)

→ möglich gemacht durch immer stärkere Beschleuniger

→ 1959: CERN Proton Synchrotron (noch heute in Betrieb)



- Fundamentale Fragen

→ Was sind grundlegenden Bausteine der Materie? → **Quarktheorie** (1964)

→ Welche Kräfte wirken zwischen den Materieteilchen? → **Standardmodell**

→ Wie erhalten Teilchen ihre (verschiedene) Masse? → **Higgs** (1964/2012)

# Aufbau der Materie

## ● Heutiges Wissen: Materie hat eine hierarchische Struktur

→ nur **Elektronen** und **Quarks** sind elementar (“punktförmig“)

### Atom:

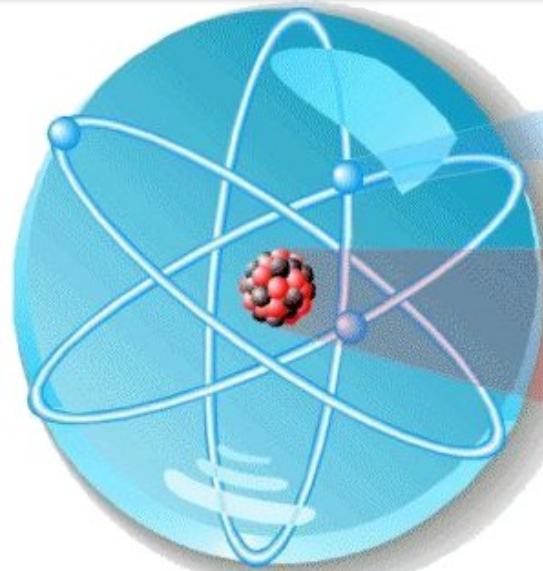
Philosophisch: Demokrit, 4. Jh. vor Christus  
Theoretisch/Experimentell: Einstein/Perrin,  
Erklärung/Messung der Brown'sche Bewegung, 1905

### Elektron:

J.J. Thomson, Kathodenstrahlen, 1897

electron

$<10^{-16}$  cm



atom  $\sim 10^{-8}$  cm



nucleus  
 $\sim 10^{-12}$  cm

### Atomkern:

Rutherford, Streuung von  
 $\alpha$ -Teilchen (Heliumkernen)  
an Goldatomen, 1910

proton  
(neutron)

Proton: Rutherford, 1919  
Neutron: Chadwick, 1932



$\sim 10^{-13}$  cm

quark

$<10^{-16}$  cm



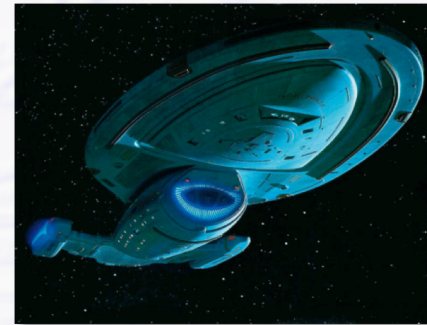
### Quark-Modell:

Gell-Mann, Zweig, 1964



# Antimaterie

- Sehr populär seit Star Trek (Raumschiff Enterprise) und Illuminati
- Antiteilchen** verhalten sich wie normale Teilchen mit gleicher Masse aber mit umgekehrter Ladung



Name	Elektrische Ladung [e]	Masse [GeV/c <sup>2</sup> ]	Elektrische Ladung [e]	(Anti-) Name
Elektron	- 1	0.0005	+ 1	Positron
Proton	+ 1	0.938	- 1	Antiproton
Neutron	0	0.941	0	Antineutron

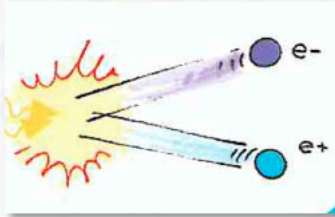
Neutron: Ladungen der Quarks im Neutron kehren sich um

Wasserstoff

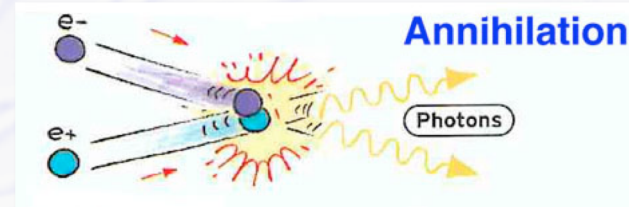
Anti-Wasserstoff

# Antimaterie

- Erzeugung von Antiteilchen zusammen mit normalen Materieteilchen aus **Umwandlung von Energie in Masse**



$$E \rightarrow mc^2$$



$$mc^2 \rightarrow E$$

- **Produktion am CERN**

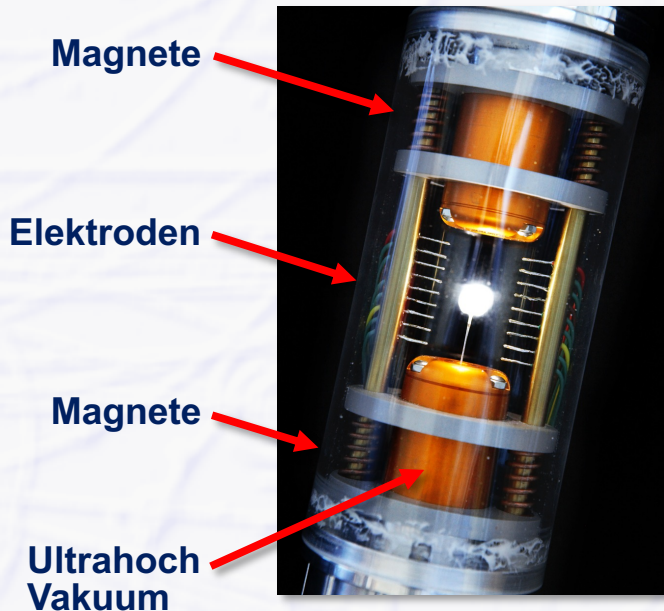
- ➔ intensiver Proton-Strahl (aus Beschleuniger) trifft auf Target (Materieblock)
- ➔ Erzeugung von Teilchen aller Art: Pionen, Neutronen, Protonen, Antiprotonen, ...
  - hohe Energien ~einige hundert MeV bis mehrere GeV
- ➔ Ausfiltern von Antiprotonen (Filterung durch Magnetfelder)
- ➔ Verlangsamung der Antiprotonen in mehreren Schritten
  - Energien im atomaren Bereich ~10 eV



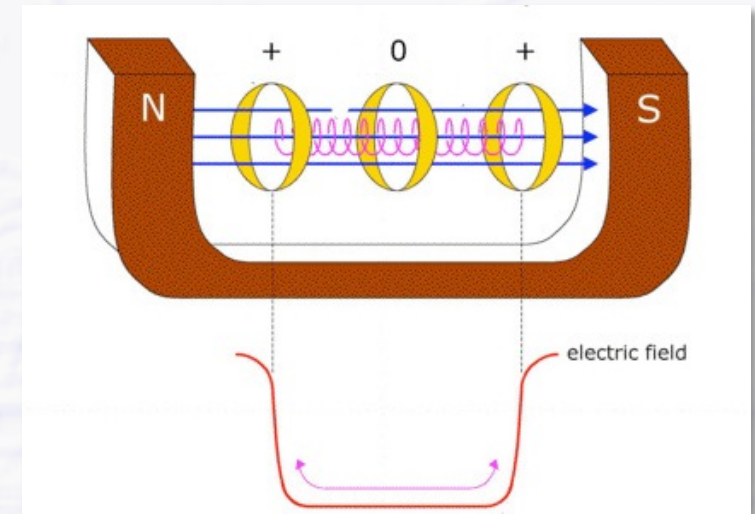
# Speicherung von Antimaterie

## ● Speicherung in Antimaterie-„Falle“

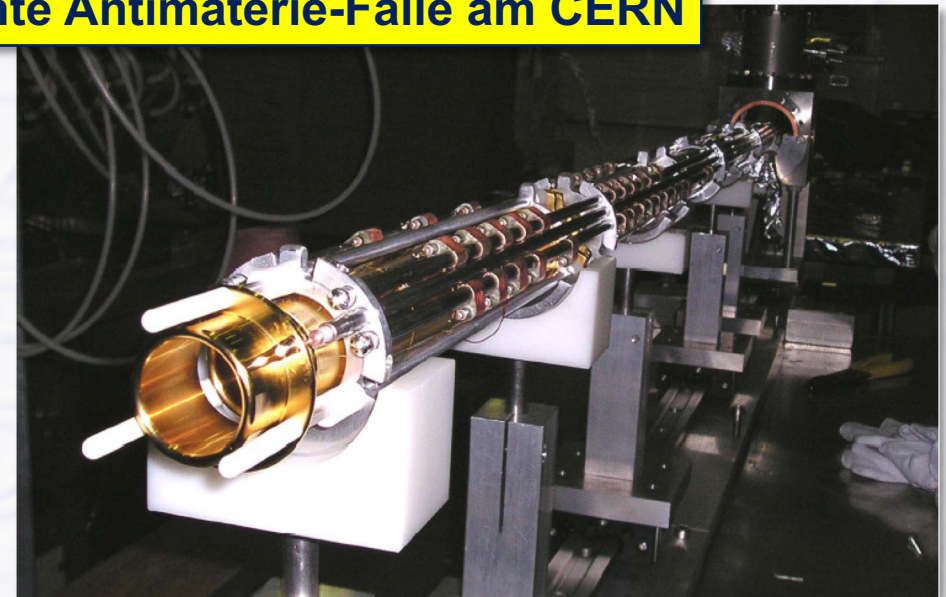
→ Kombination von magn.+ el. Feldern



Filmversion  
aus „Illuminati“



Echte Antimaterie-Falle am CERN



→ Speicherdauer: ~viele Monate

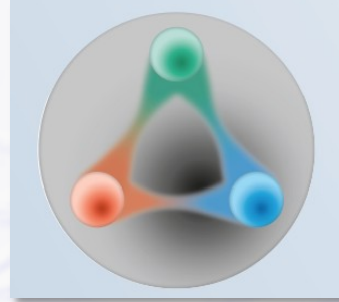
→ ~10 Millionen Antiprotonen

● geplant: ~1 Milliarde Antiprotonen

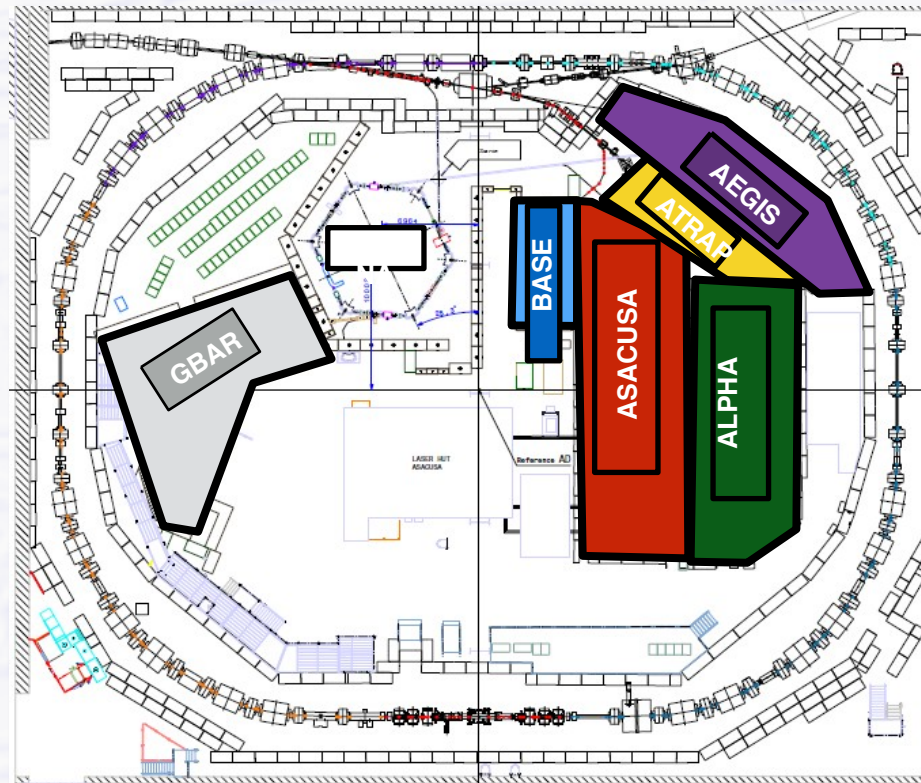
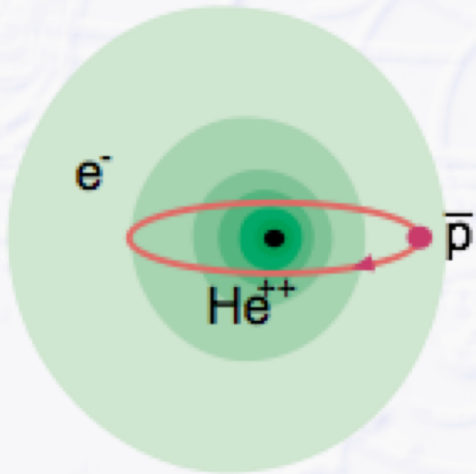
# Die Antimaterie Fabrik



Antiprotonen

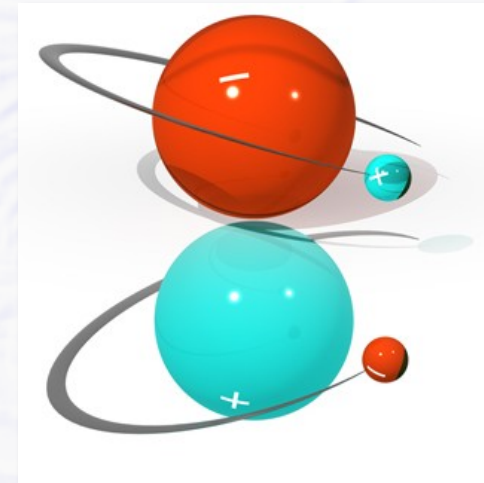


Antiprotonisches Helium



Antiproton Decelerator ("Entschleuniger")

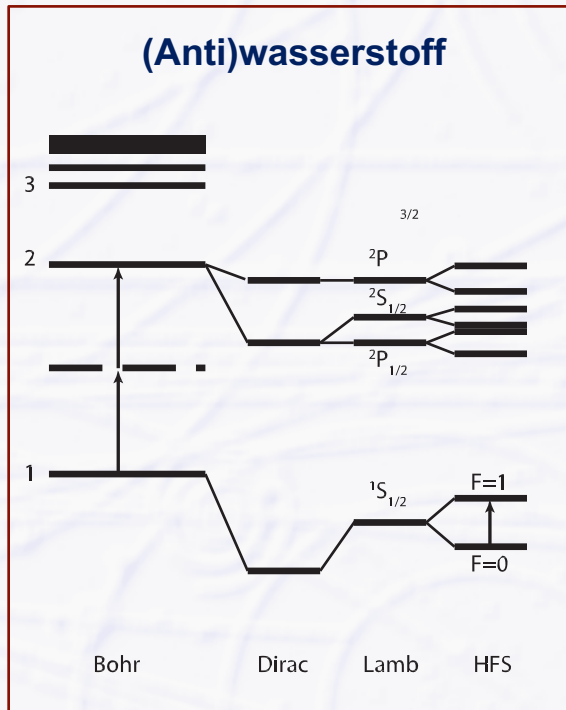
Antiwasserstoff





# Experimente mit Antimaterie

## ● Spektroskopie

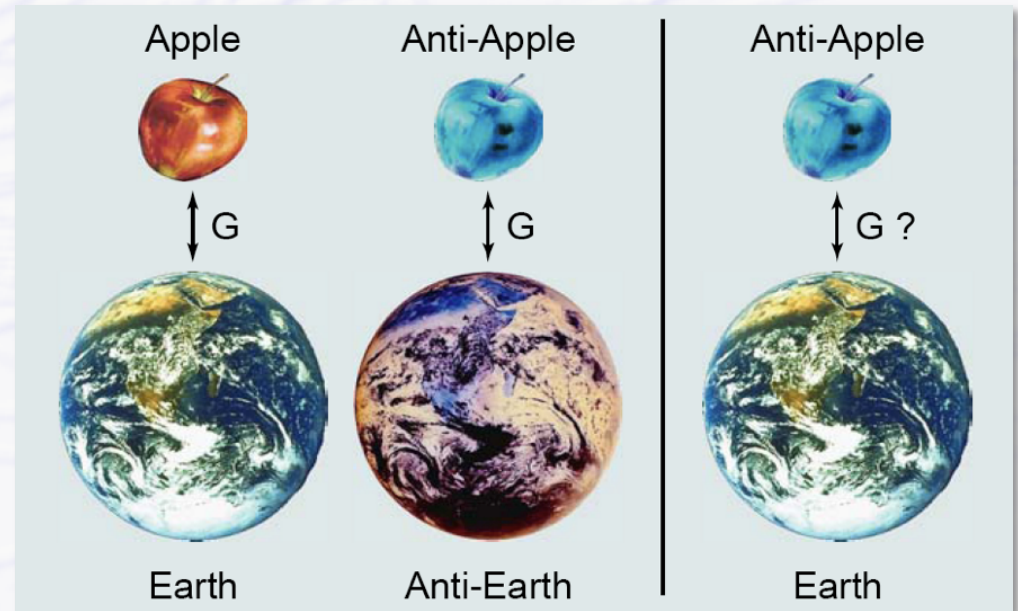


- Vergleich der Spektren von Wasserstoff und Antiwasserstoff
- Übereinstimmung auf  $< 10^{-14}$

## ● Gravitation

gemessen: erwartet:

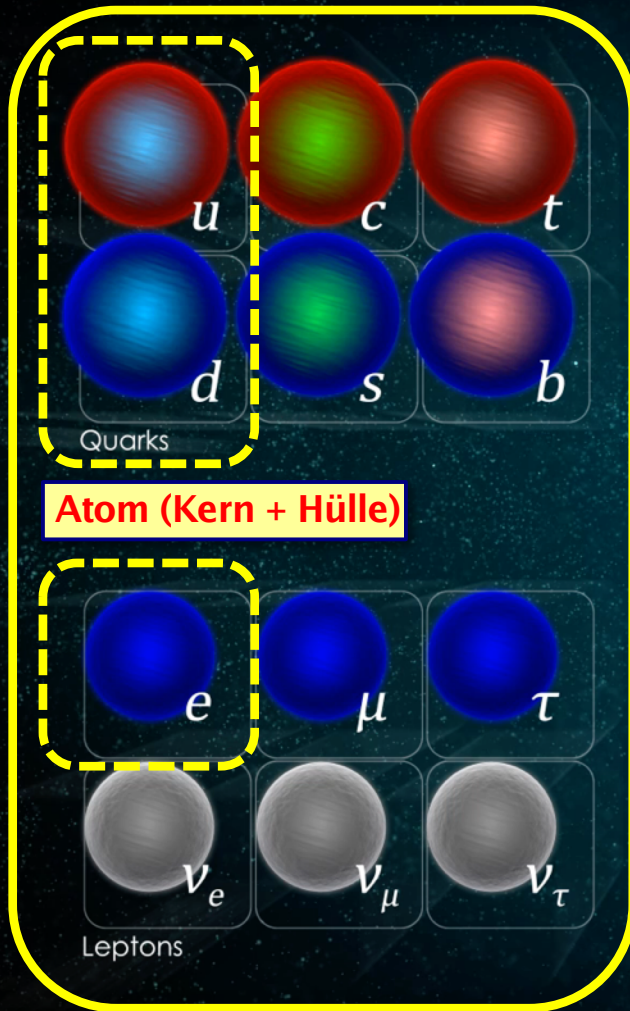
???



- Keine Vorhersage für die Anziehung / Abstoßung von Materie und Antimaterie
- **Antigravitation???**
- bisher noch nicht gemessen

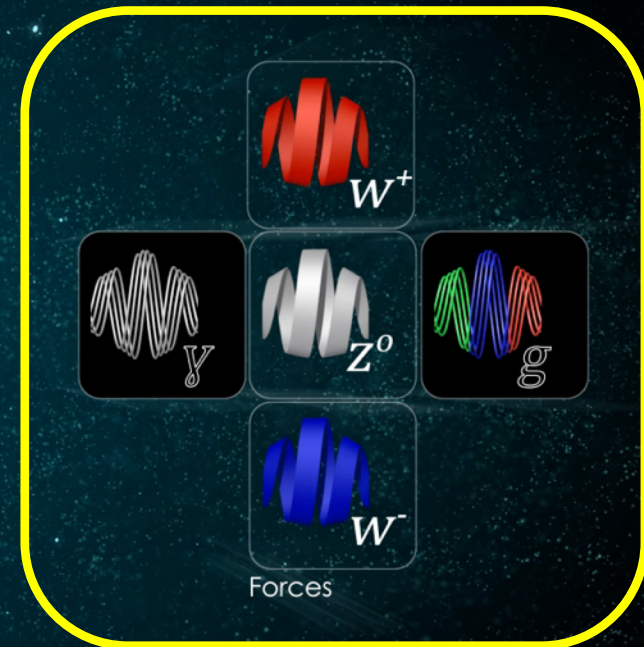
# Das Standardmodell auf einen Blick

- Entwickelt seit den 1960er Jahren



**Materie (Materieteilchen)**

**Masse  
(Higgs Teilchen)**

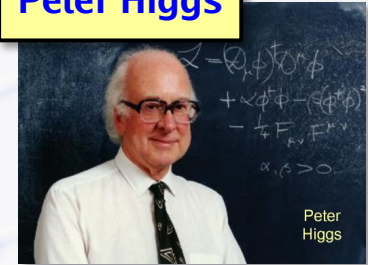


**Kräfte (Kraftteilchen)**



# Higgs-Mechanismus

Peter Higgs



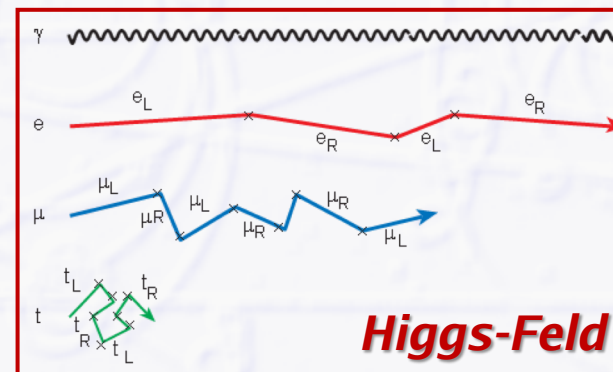
- **Das Standardmodell ist (war) fast komplett**
  - alle Materie- und Kraftteilchen wurden gefunden
    - zuletzt: top-quark (1995), tau-neutrino (2000)
  - **aber: alle Teilchen haben im Standardmodell keine Masse**
- **Idee von Peter Higgs (1964) und anderen**
  - **Das Vakuum ist nie leer, sondern immer erfüllt mit einem Higgs-Feld**
    - Higgs-Feld ähnlich elektrischem Feld oder Magnetfeld
  - **Das Higgs-Feld existiert überall im gesamten Universum**
    - zunächst masselose Teilchen wechselwirken ständig mit dem **Higgs-Feld**
    - Wechselwirkung verursacht “Trägheit” = Teilchen erhält träge Masse

keine Masse: Photon

geringe Masse: Elektron

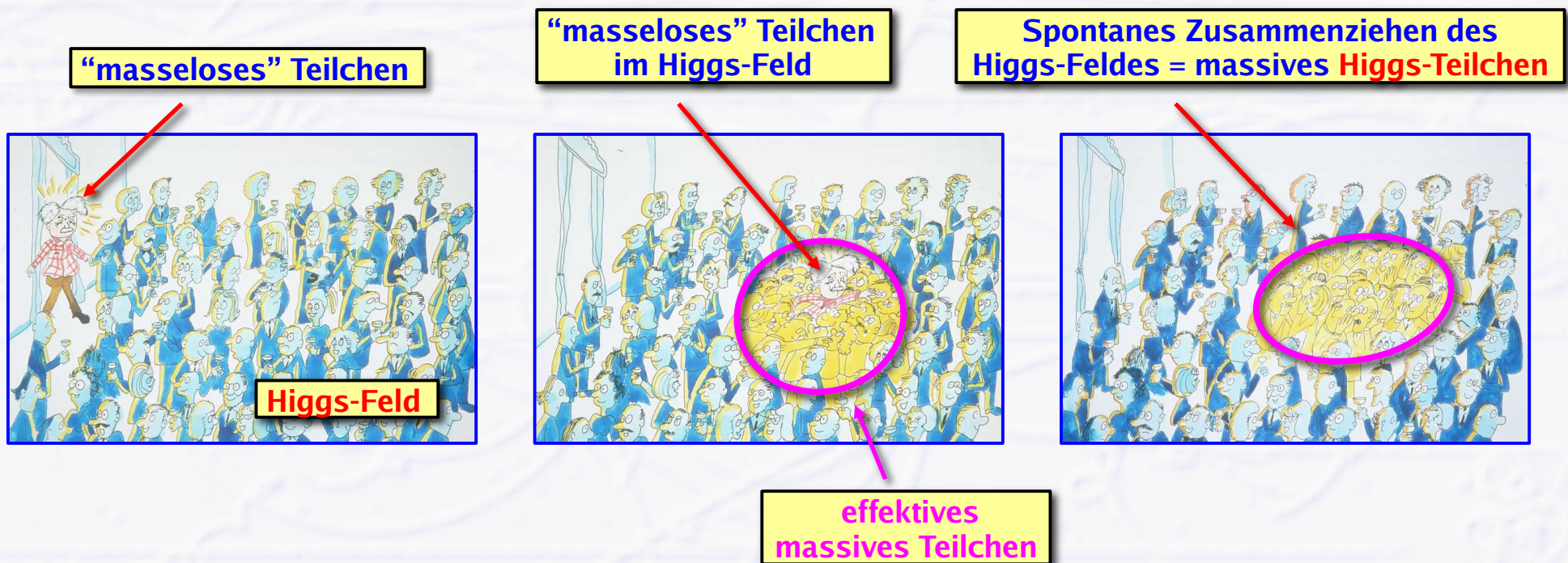
mittelschwere Masse: Myon

sehr schwere Masse: Top-Quark



# Higgs-Feld $\rightarrow$ Higgs-Teilchen

- **Dave Miller** (UC London) 1993 zum damaligen britischen Wissenschaftsminister auf dessen Frage zur Bedeutung des Higgs-Teilchens
  - ...und warum er dafür Steuergelder ausgeben sollte
  - Vergleich mit politischer Partei (**Parteimitglieder = Higgs-Feld**) und dem plötzlichen Auftreten der **Parteivorsitzenden (masseloses Teilchen)**





# ***Higgs-Feld → Higgs-Teilchen***

- **Higgs-Feld = Wasserfläche, Higgs-Teilchen = Wassertropfen**

**Higgs-Feld**

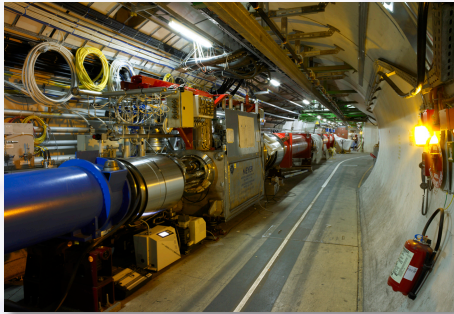
**Higgs-Teilchen**

**Zerfall**

**Anregung**

Credits: [stepvideolabs \(2014\)](#)

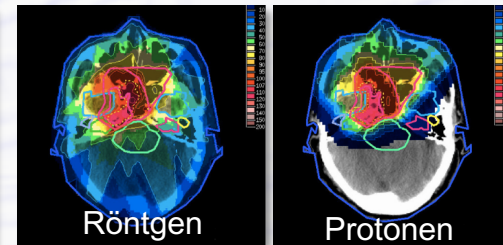
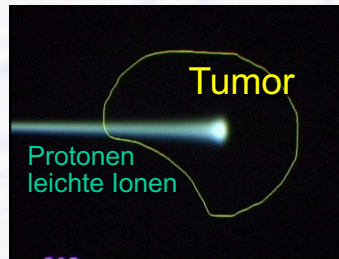
# “Spin-offs” der Teilchenphysik: medizinische Anwendungen



**Beschleunigte Teilchenstrahlen**  
~30'000 Beschleuniger weltweit  
davon ~17'000 für medizinische Zwecke



## Hadronentherapie



Europa und Japan  
sind führend in  
Ionenstrahltherapie

>70'000 Patienten weltweit behandelt (30 Anlagen)  
davon >21'000 Patienten in Europa (9 Anlagen)

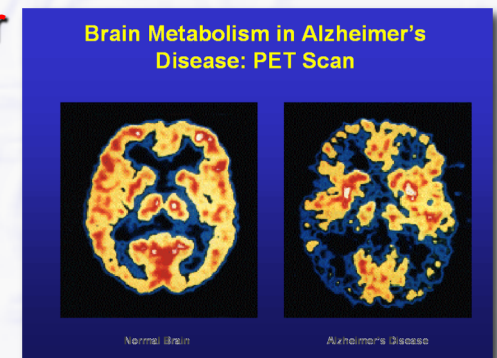
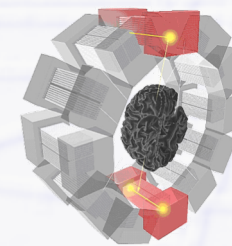
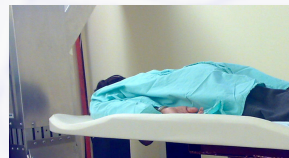


**Nachweis von  
Teilchen**



## Bildgebung PET Scanner

Klinischer Test in  
Portugal eines neuen  
Brustdarstellungs-  
Systems (ClearPEM)



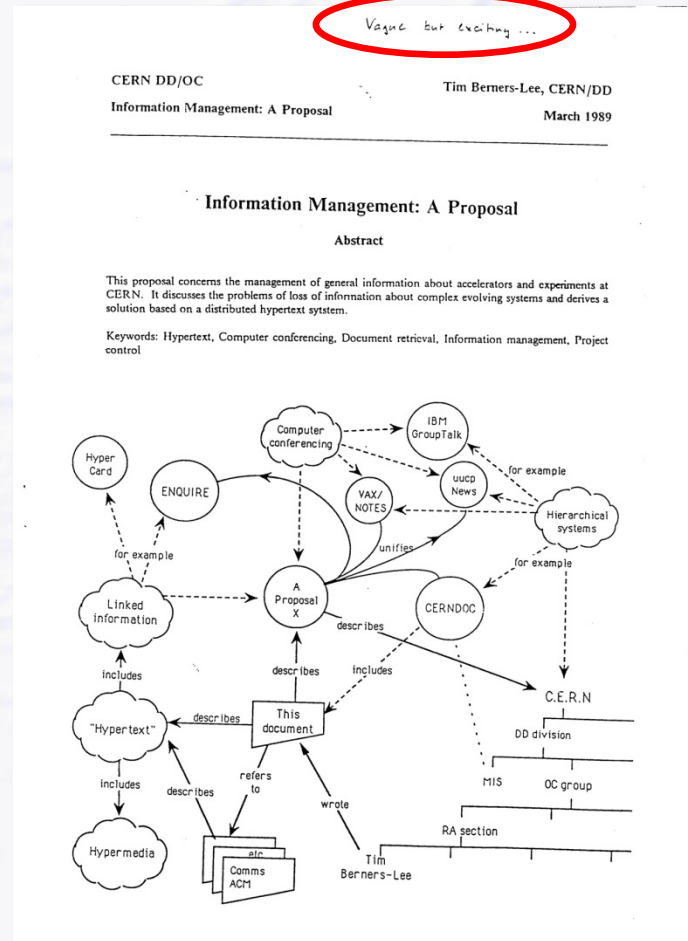
PET = Positron Emission Tomography  
(Positronen = Antimaterie)



# CERN: “Where the Web was born...”

## Die Idee von Tim Berners-Lee (März 1989):

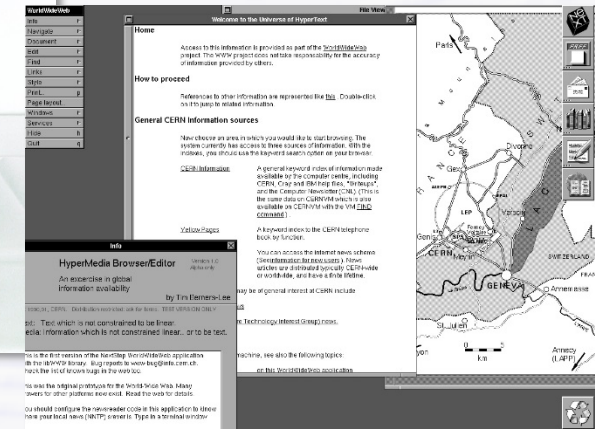
Kommentar des Chefs:  
“Vague but exciting...”



## Der erste Web Server: ein NEXT computer (Januar 1990)



Screenshot

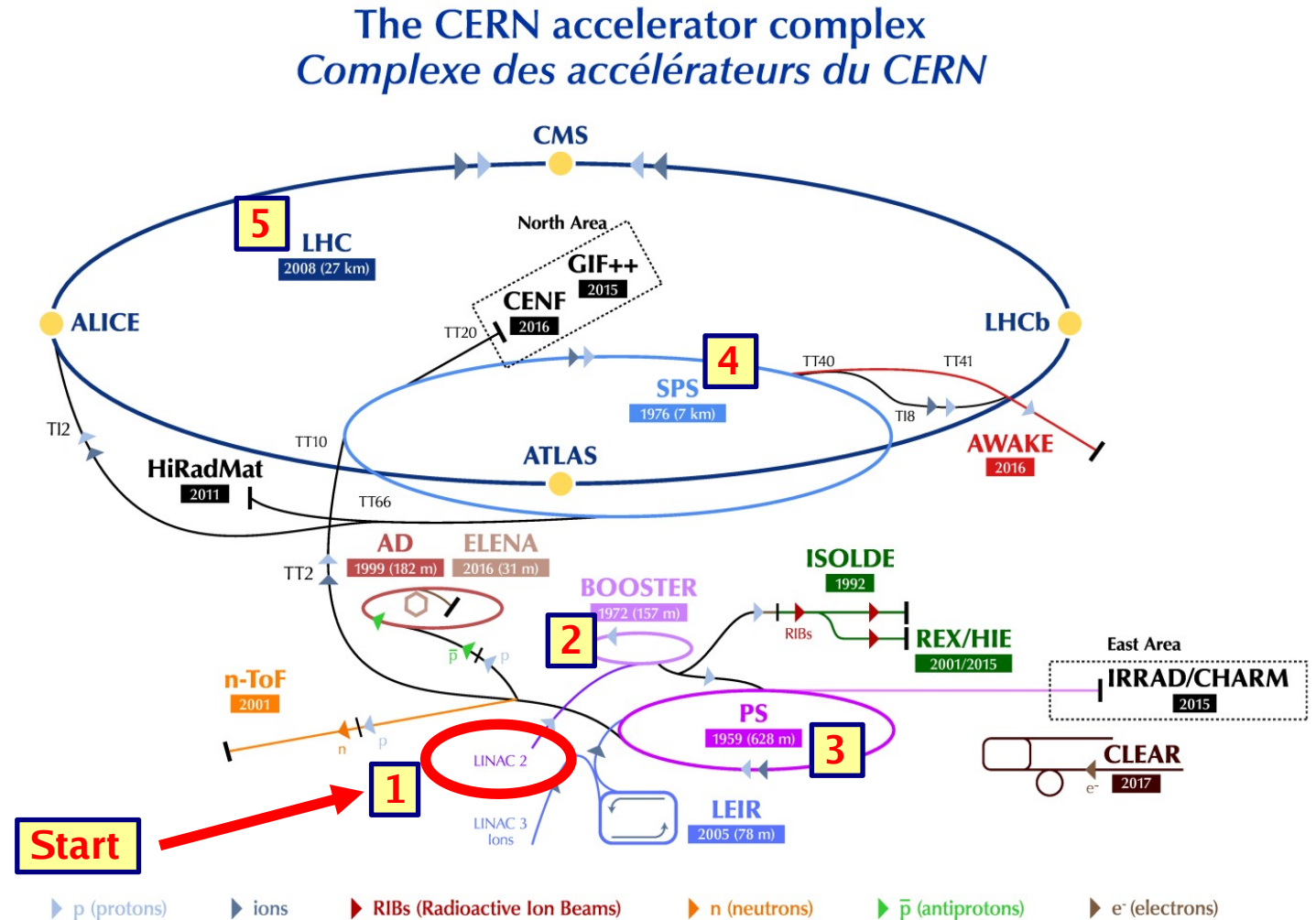
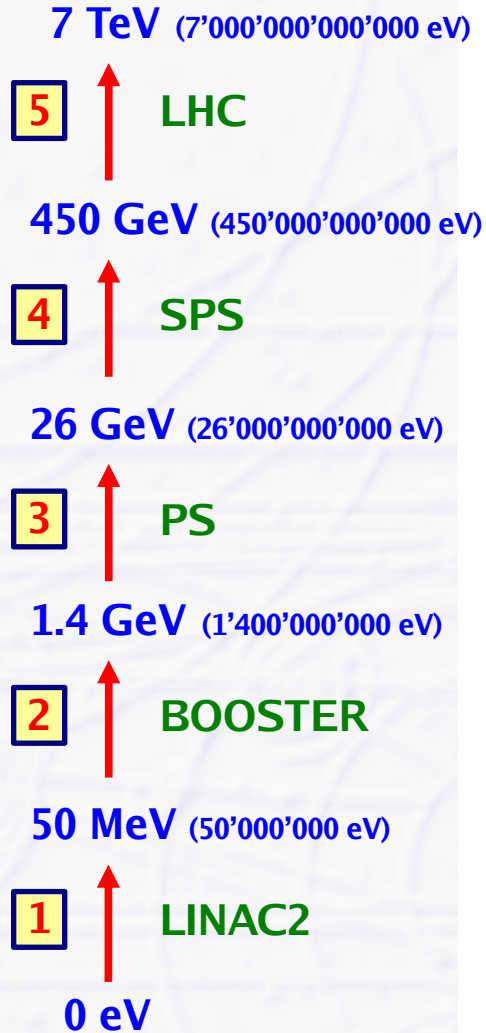


## 2 Jahre später im Büro (Februar 1991)



## 20. Jahrestag (März 2009)

# CERN Beschleuniger Komplex



LHC - Large Hadron Collider // SPS - Super Proton Synchrotron // PS - Proton Synchrotron // AD - Antiproton Decelerator // CLEAR - CERN Linear Electron Accelerator for Research // AWAKE - Advanced WAKEfield Experiment // ISOLDE - Isotope Separator OnLine // REX/HIE - Radioactive EXperiment/High Intensity and Energy ISOLDE // LEIR - Low Energy Ion Ring // LINAC - LINEar ACcelerator // n-ToF - Neutrons Time Of Flight // HiRadMat - High-Radiation to Materials // CHARM - Cern High energy AcceleRator Mixed field facility // IRRAD - proton IRRADiation facility // GIF++ - Gamma Irradiation Facility // CENF - CErn Neutrino platForm

zum Vergleich:  
1.5 eV





# Der LHC: ~34 Jahre... und länger...

**1984:** Erste Ideen zum LHC (2 x 5.9 TeV) und SSC (2 x 20 TeV), LEP Tunnelbau beginnt

Idee 1984: LHC über existierenden LEP Beschleuniger

1984

**1988:** SSC genehmigt (Waxahachie, Texas)

**1989:** Erste Kollisionen bei LEP und SLC, F&E für LHC Detektoren beginnt

**1993:** SSC Bau gestoppt!!!

**1994:** LHC genehmigt (geplanter Start 2005)

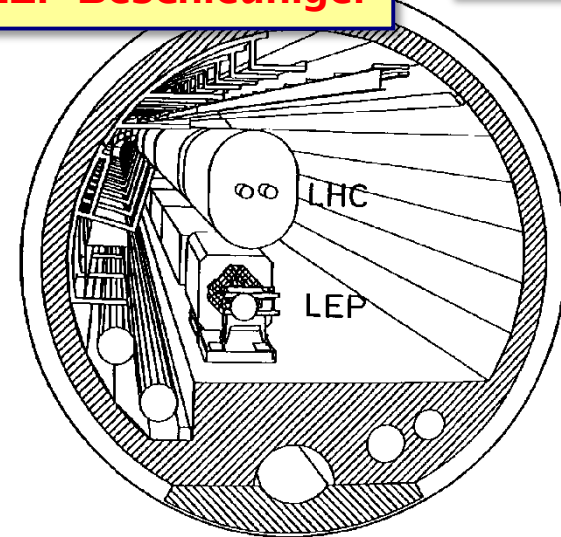
**1995:** Entdeckung des top Quark am Fermilab durch CDF (und D0), ATLAS und CMS genehmigt

**1998:** Beginn des LHC Baus

**2000:** Ende von LEP, kein Higgs gefunden...

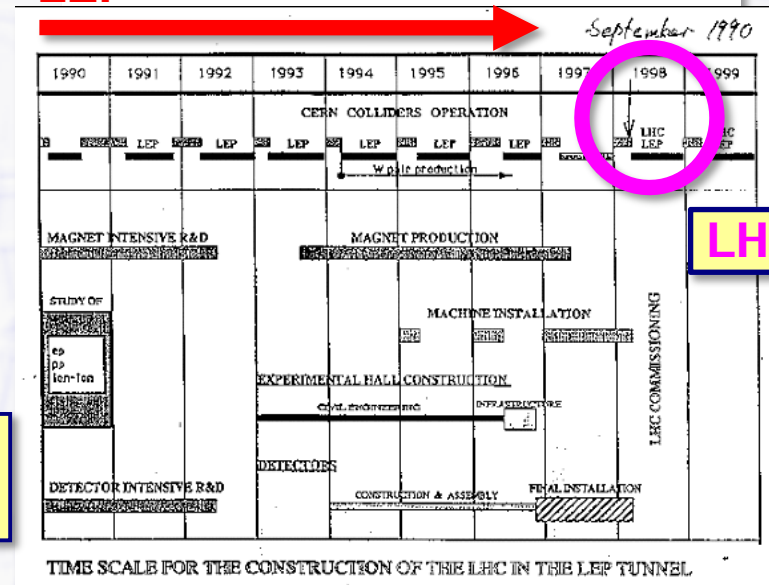
**2008:** LHC Start

Plan 1990:  
LHC Start 1998...



LARGE HADRON COLLIDER  
IN THE LEP TUNNEL

LEP



LHC

# LHC in Zahlen

- **1232 Dipole, 8.33 Tesla @ 7 TeV bei 11850 A**
  - ➔ + 392 Quadrupole
  - ➔ + 3700 Multipol-Korrektur-Magnete + 2500 andere Korrektur-Magnete
  - ➔ 1200 Tonnen NbTi supraleitendes Kabel mit 7600 km Länge
  - ➔ gespeicherte Energie im Magnetfeld 10 GJ (  $\frac{1}{2} LI^2$  )
- **gesamte Kaltmasse: 30'000 Tonnen**
  - ➔ **120 Tonnen suprafluides Helium** (1.9 K) zur Kühlung
  - ➔ Energie für Quench: 0.5 - 20 mJ/cm<sup>3</sup> = 10<sup>7</sup> Protonen bei 7 TeV
- **Anzahl der Stromverbindungen zwischen Magneten**
  - ➔ 10'000 supraleitende Verbindungen zwischen Dipolen
  - ➔ 50'000 Verbindungen für Korrektur-Magnete
- **Vakuum: 10<sup>-10</sup> mbar = 3 Millionen Moleküle pro cm<sup>3</sup>**

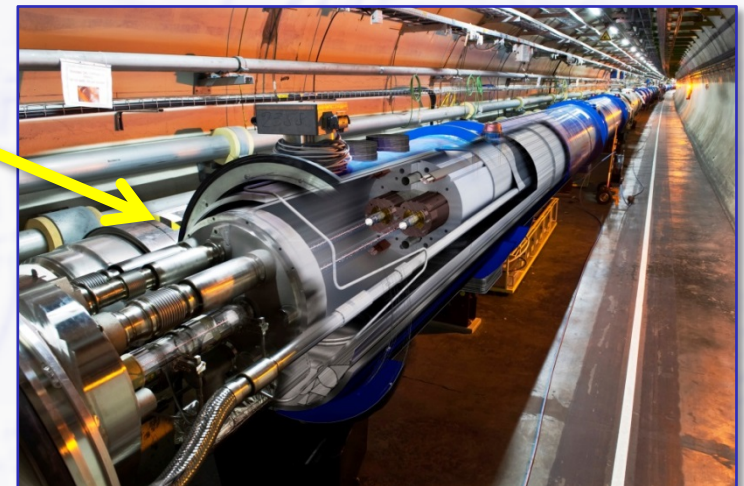


# LHC Tunnel

- Umfang: 27 km
- Durchmesser: 3.8 m

## ● Umfangreiche Spitzentechnologien

- Supraleitung
- Magnete
- Vakuum
- Hochfrequenz
- Strahlkontrolle
- Sicherheit



# gespeicherte LHC Strahlenergie

- 2808 Teilchenbündel,  $1.1 \times 10^{11}$  Protonen/Bündel @ 7 TeV
- 350 MJ gespeicherte Energie pro Protonstrahl

Airbus A320 (78 t) bei 340 km/h



ICE 3 Zug (420 t) bei 147 km/h



Queen Mary 2 (150'000 t) bei 4.2 Knoten (7.8 km/h)



Foto: Santiago Mena Sáez.

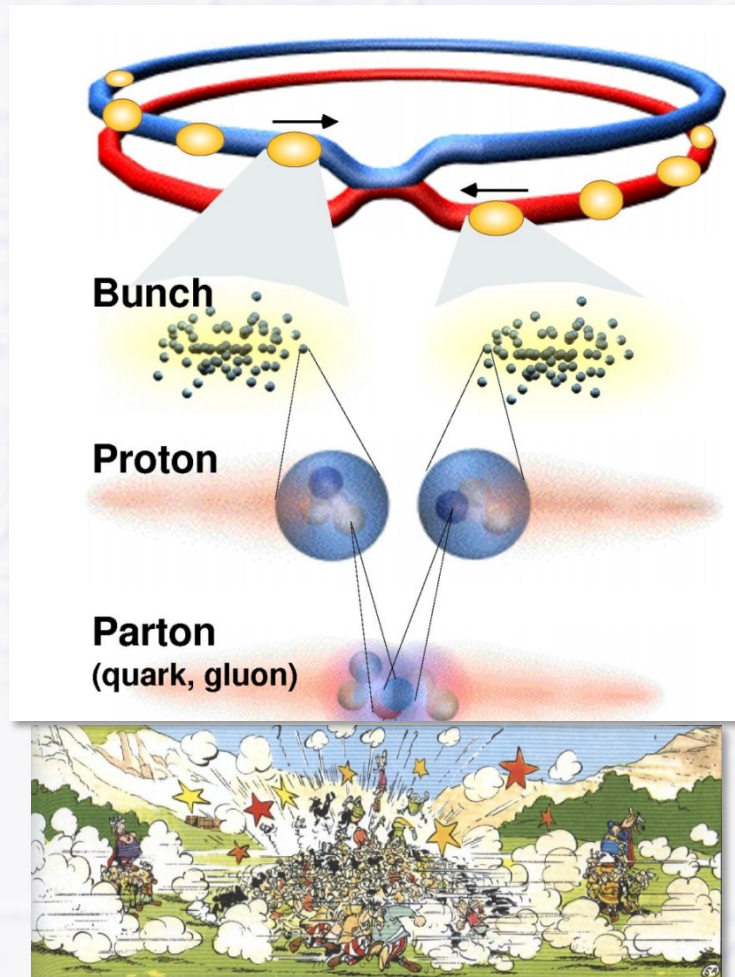
**Größtes Problem bei LHC ist die Kontrolle der gespeicherten Energie**



# Proton – Proton Kollisionen\* im LHC

- \* = Der LHC kann auch schwere Bleikerne (Schwerionen) beschleunigen und kollidieren lassen

→ Spezialexperiment für Schwerionenphysik: ALICE



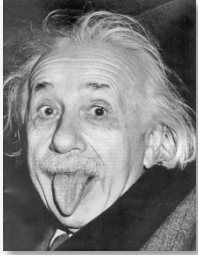
## Proton – Proton (Design Parameter)

2808 x 2808 Protonenbündel (bunches)  
mit 7.5 m Abstand (25 ns zeitlich)  
 $1.1 \times 10^{11}$  Protonen/Bündel

$\sim 10^9$  pp Kollisionen/s  
= Überlagerung von  $\sim 50$  pp-Kollisionen  
pro Strahlkreuzung: **pile-up**

$\sim 1600$  geladene Teilchen im Detektor  
pro Strahlkreuzung

# Methoden der Teilchenphysik

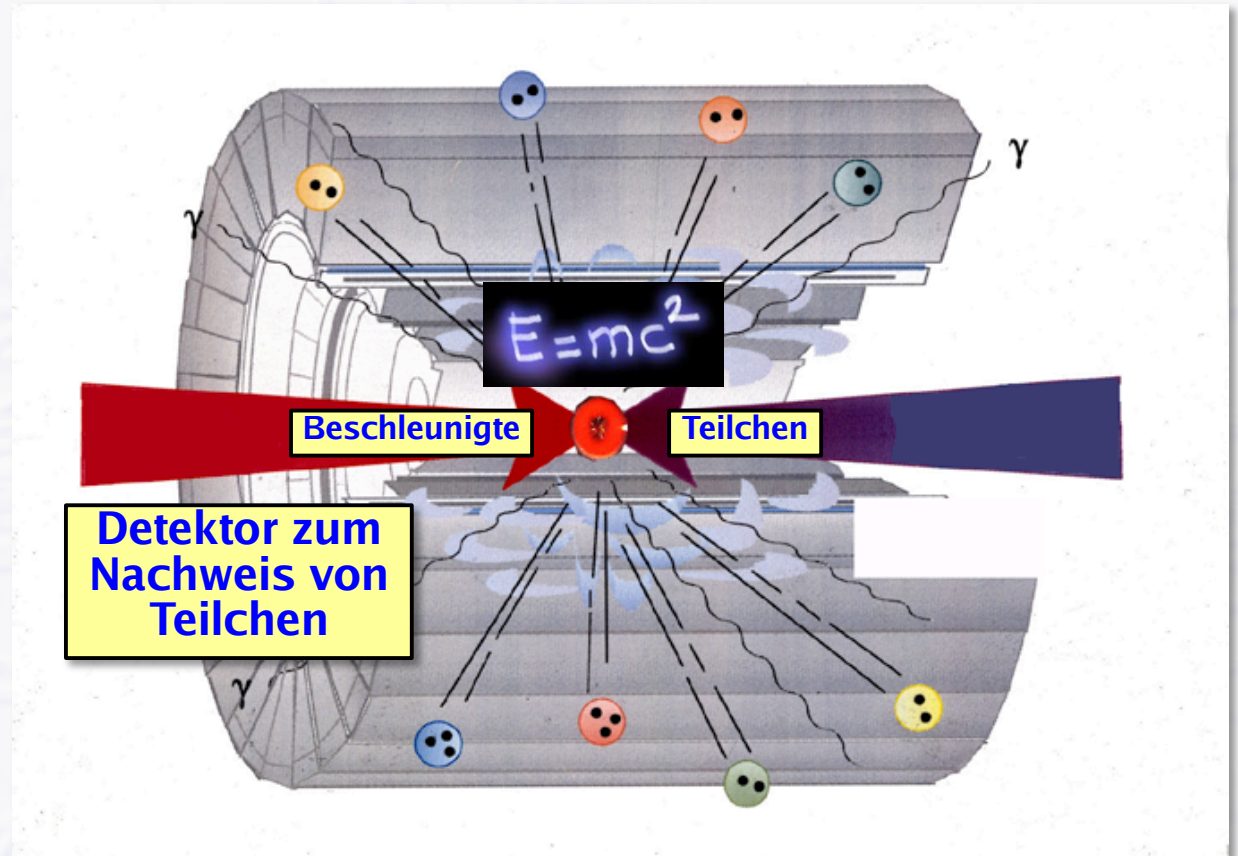


**Einstein  
(1905):**

**Materie ist  
konzentrierte Energie!**

**Materie lässt sich in  
Energie umwandeln  
und umgekehrt!**

$$E = m c^2$$



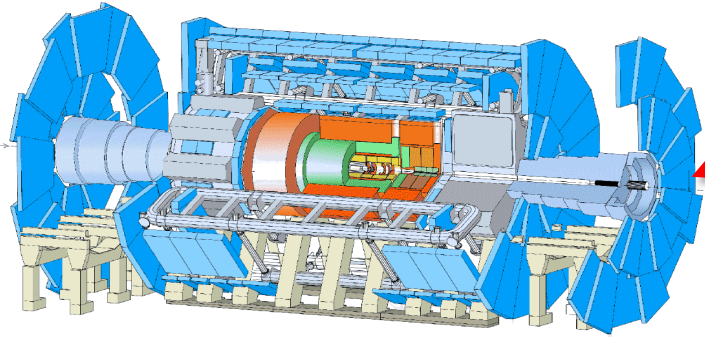
## ● Dies nutzen wir bei einem Teilchenbeschleuniger

- Protonen werden beschleunigt  $\Rightarrow$  **kinetische Energie**
- **Umwandlung der kinetischen Energie** bei der Kollision in **Materie**
- **Neue Teilchen entstehen** (neue Materie) und müssen **vermessen** werden

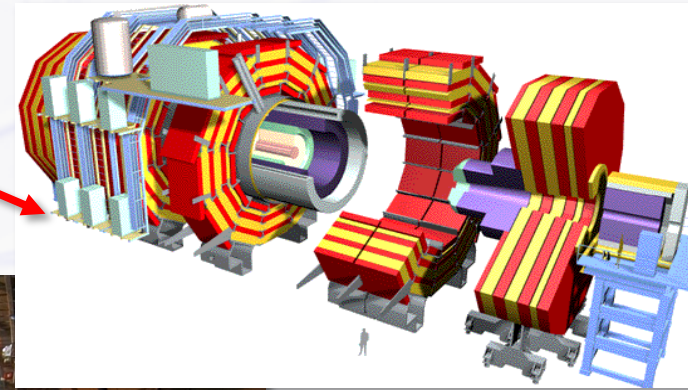


# LHC Detektoren

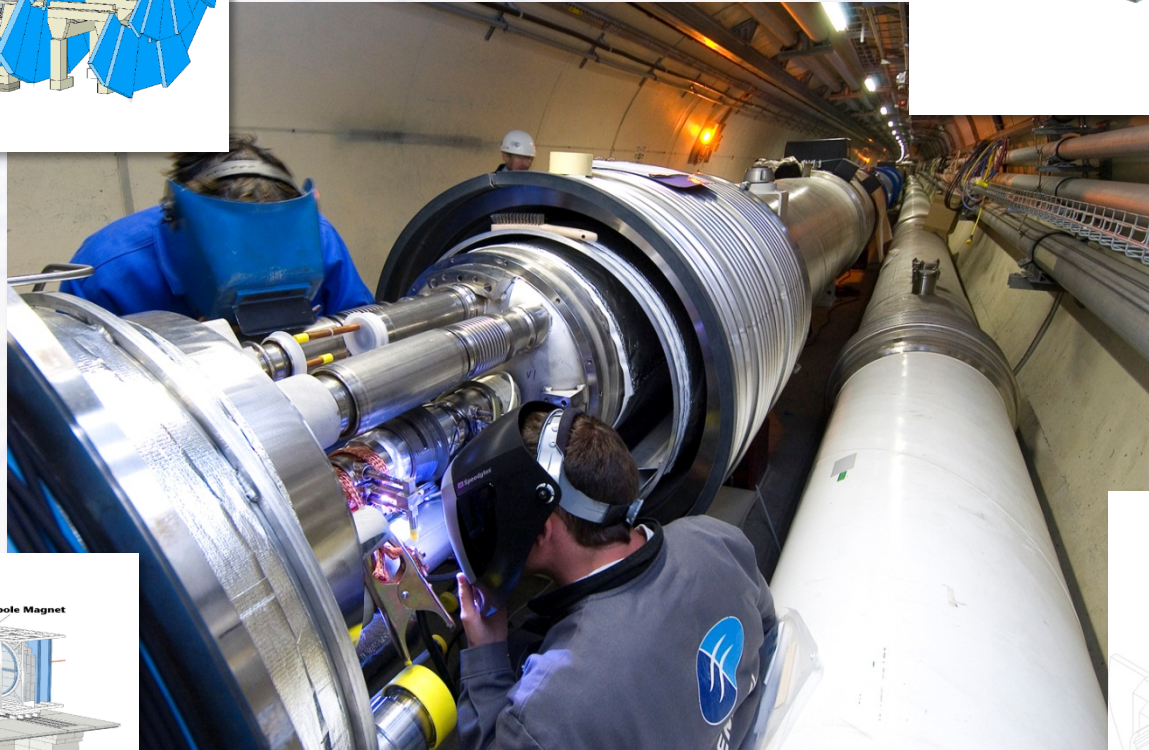
Vielzweckdetektoren  
(gut für alles...)



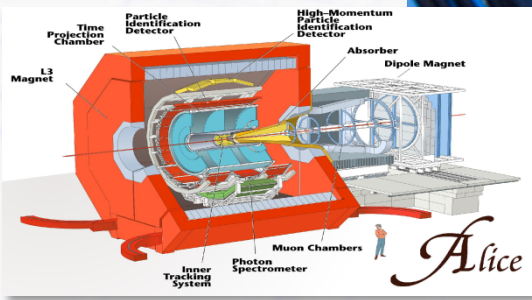
ATLAS



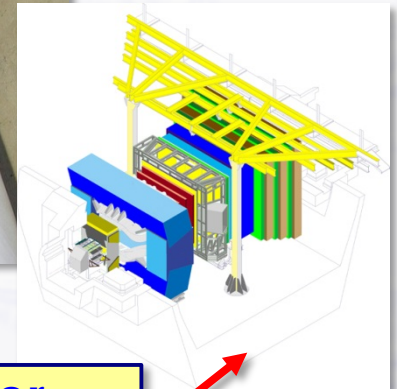
CMS



ALICE



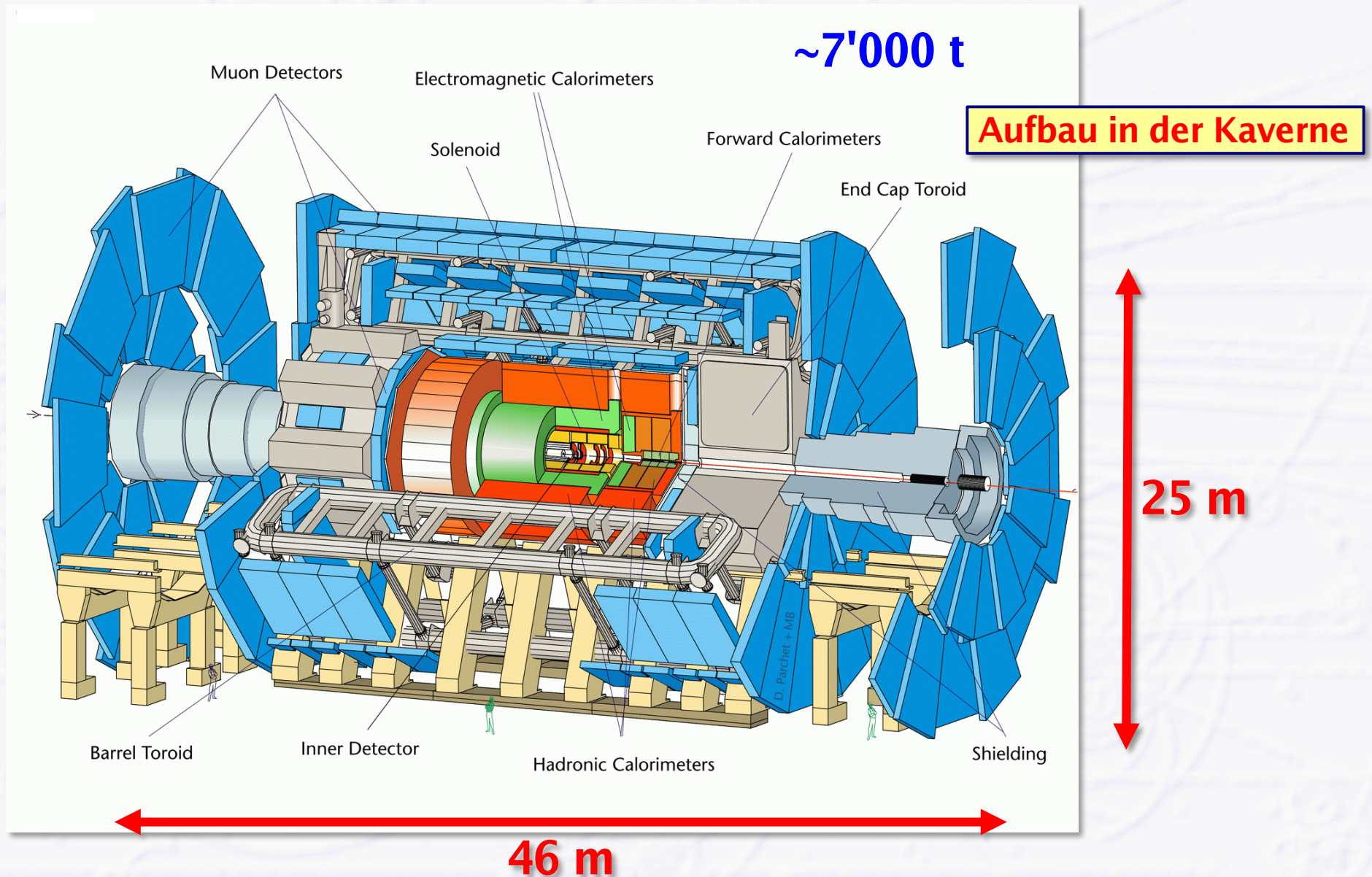
Spezialdetektor für  
Schwerionenkollisionen



Spezialdetektor  
für Physik mit b-Quarks

LHCb

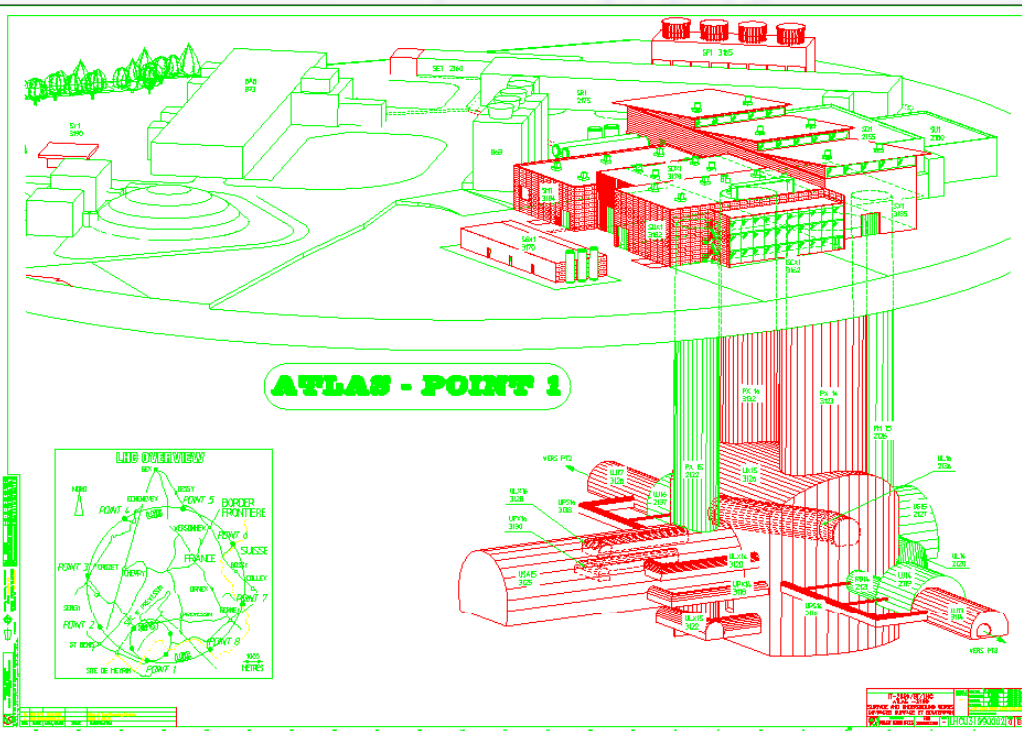
# ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS)





# ATLAS unterirdische Kaverne

**Große Kaverne,  
2 Materialschächte 18m + 12m Ø,  
2 kleine Schächte für Fahrstühle + Treppen**



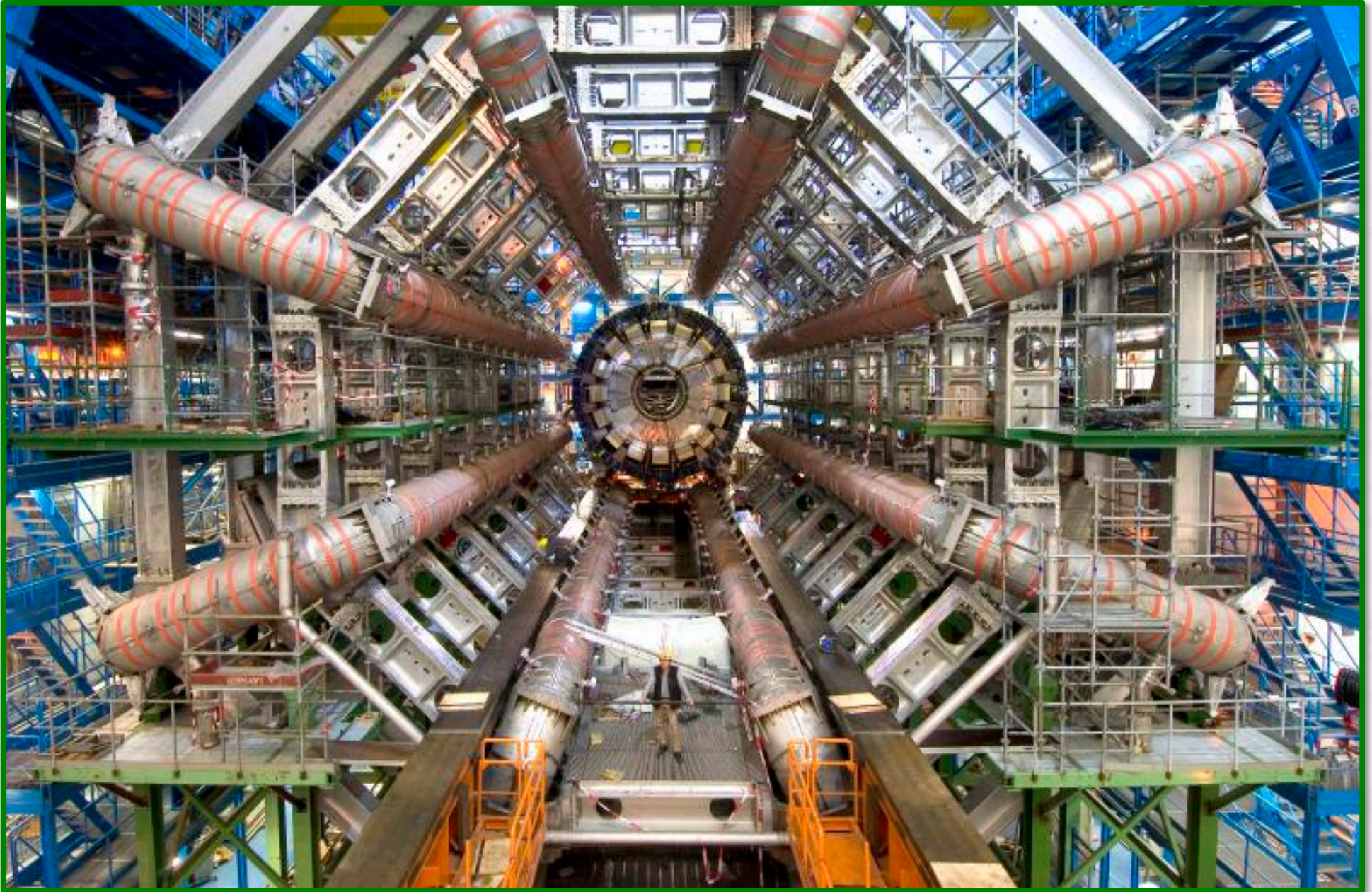
**ATLAS Detektor im Vergleich  
zum 5-stöckigen ATLAS+CMS  
Hauptgebäude am CERN**



**Länge = 55 m  
Breite = 32 m  
Höhe = 35 m**



# ***ATLAS Barrel Toroid fertiggestellt*** (Nov 2005)





# ***Detektortechnologie und Kunst***

**Bühnenbild der Oper “Les Troyens” in Valencia, Oktober 2009**





# ***“Erstes Higgs” am LHC (4. April 2008)***





# LHC Start – 10. September 2008



## ● Größtes Medienevent in der Geschichte der Wissenschaft

- Top News weltweit (keine weiteren Katastrophen, Politikevents etc.)
- Eurovision live satellite feed von 9:00-18:00 + Webcast
  - 2500 TV Ausstrahlungen
  - mehrere hundert Millionen Zuschauer
- 260 akkreditierte Journalisten
  - 5800 Presseartikel
- 100 Millionen Hits auf den CERN Webseiten



CERN Control Centre (LHC Kontrollraum)

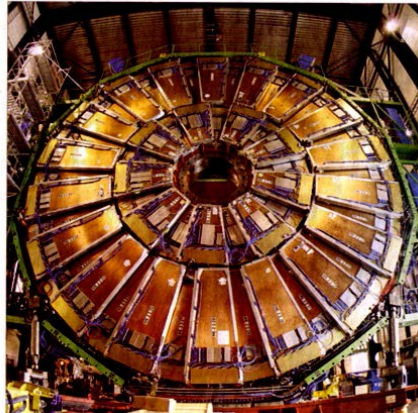




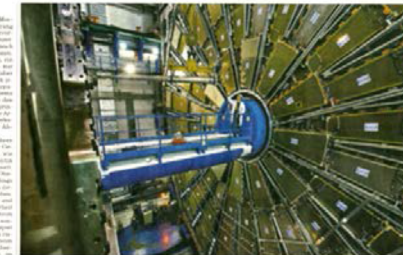
# LHC Start in deutschen Medien



**Jetzt geht es rund**  
am Forschungszentrum Cern nimmt heute der größte Teilchenbeschleuniger der Welt seinen Betrieb auf



Das Streiflicht



Die Urknall-Maschine läuft

**Karlsruhe uneinig**  
Verfassungsrichter beraten über Pannenzuschüsse

Karlsruhe: Die Verfassungsrichter beraten über Pannenzuschüsse. Die Bundesverfassungsrichter haben sich am Freitag mit dem Streit um die Pannenzuschüsse für die LHC auseinandergesetzt. Die Richter werden in der kommenden Woche über die Zulassung der Zuschüsse entscheiden. Die Bundesregierung hatte die Zuschüsse für die LHC beantragt, um die Kosten für die Beschleuniger zu decken. Die Bundesländer haben jedoch Einwände erhoben, da die Zuschüsse nicht für die Forschung, sondern für die Beschleuniger selbst bestimmt sind.

**Bedienungsanleitung bleibt vielen Senioren erspart**  
Berlin: Die Bundesregierung hat eine Bedienungsanleitung für die LHC veröffentlicht. Die Anleitung ist in deutscher Sprache und enthält Informationen über die Funktionsweise des Beschleunigers. Die Bundesregierung hofft, dass die Anleitung den Senioren helfen wird, die LHC besser zu verstehen.

Das größte Experiment der Menschheit

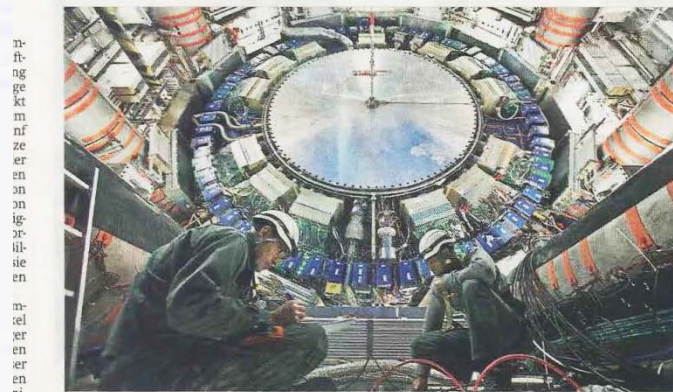


Es ist ein Versuch der Superlativ: In einem 27 Kilometer langen Ringraum unter der französisch-schweizerischen Grenze bei Genf werden heute zum ersten Mal Protonen beschleunigt. Mit der größten Experimentieranlage der Welt, dem Cern, sollen grundlegende Fragen der Teilchenphysik und Kosmologie erstmals beantwortet werden. Zuvor hatte der LHC genannte Teilchenbeschleuniger nach dem Vorbild der Schallmauer gewartet, weil einige Klappen durch die großen Versuche des Unterbaus der Welt befreit. N.E.

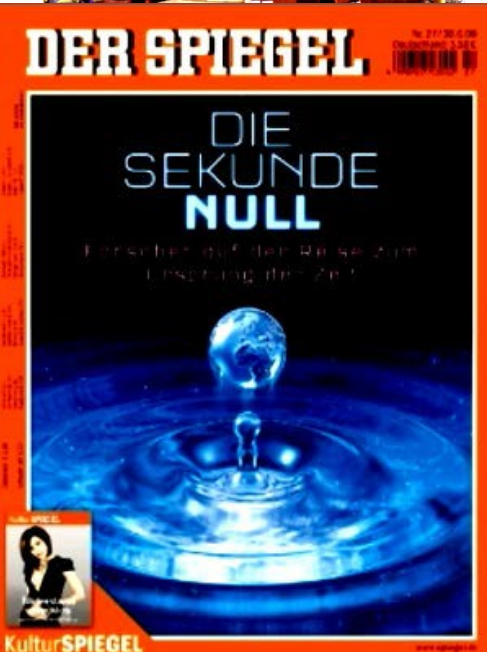


## Zertrümmern und Erkennen

Am 10. September 2008 gab es die ersten Teilchenkollisionen an der „Weltmaschine“, dem Teilchenbeschleuniger LHC am Forschungszentrum Cern bei Genf in bislang unbeobachtete Region.



Die ersten Teilchenkollisionen an der „Weltmaschine“ am 10. September 2008.

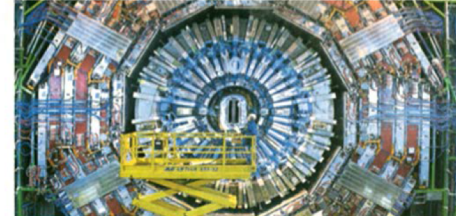


Durch den direkten Kontakt mit den Wissenschaftlern wollen wir jungen Leuten die Art und Weise näherbringen, wie moderne Forschung – gerade Grundlagenforschung – stattfindet, sagt Michael Kobel. Entdeckergeist sollte geweckt werden, die Begeisterung dafür, tiefergehende Fragen an die Natur zu stellen.



Leidung  
Flieger  
merstag  
trag gegen  
tschweizer

Supermaschine am Start



**Berlin**  
Rot-Rot ohne Opposition

In der Hauptstadt ist die Linke die einzige Partei, die bei den Bundestagswahlen 2009 an der Spitze stehen könnte. Die Linke hat in Berlin die meisten Stimmen erhalten und ist damit die stärkste Partei. Die Linke hat sich mit der SPD verbündet, um die Regierung zu bilden. Die SPD hat jedoch keine Chance, die Regierung alleine zu bilden.



# ***Erste LHC Kollisionen bei hoher Energie***





# Higgs-Teilchen Entdeckung 4. Juli 2012

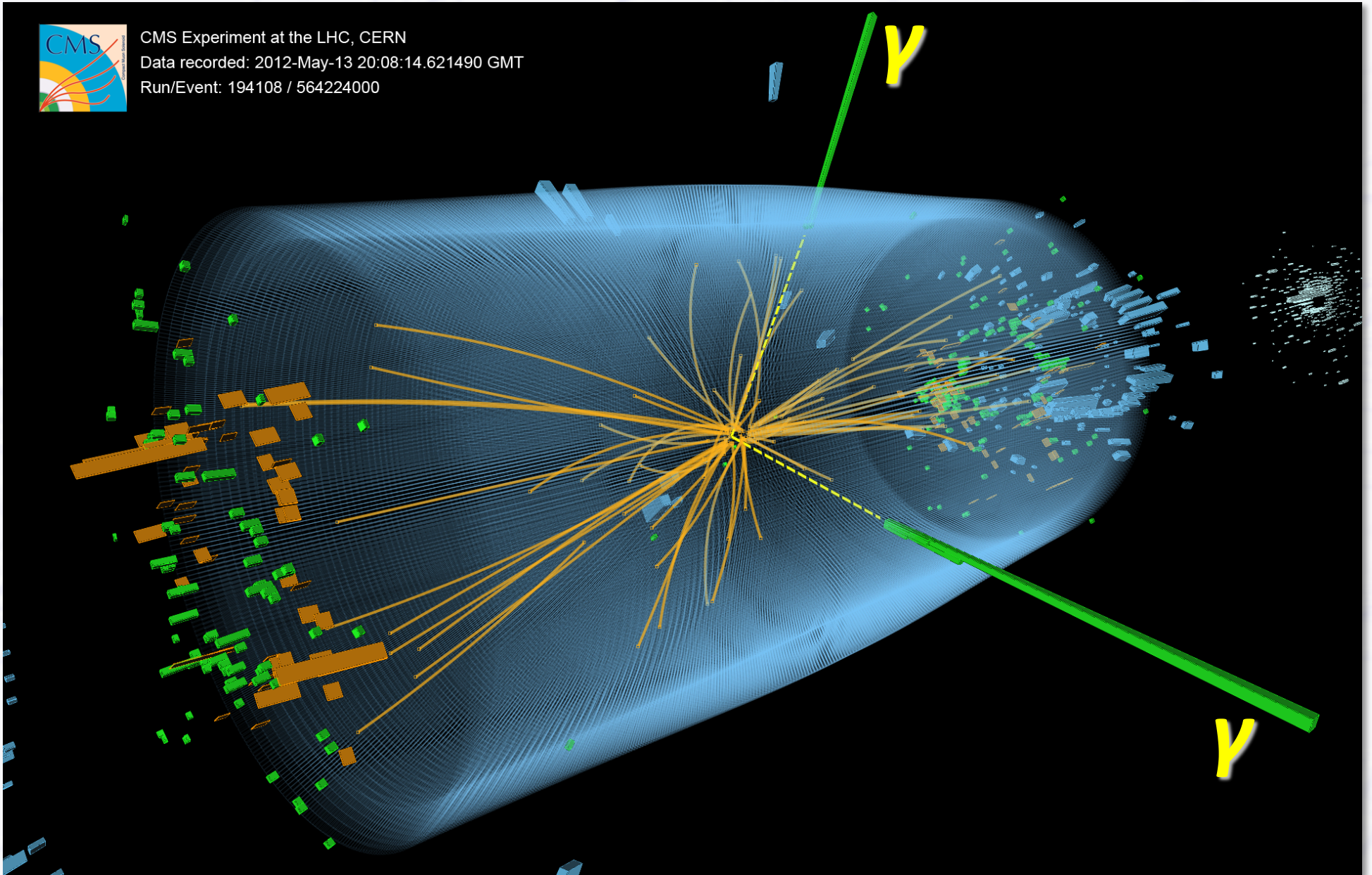




# Higgs Zerfall $H \rightarrow \gamma\gamma$



CMS Experiment at the LHC, CERN  
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT  
Run/Event: 194108 / 564224000





# Higgs in den Medien





# Higgs: Stand der Erkenntnisse

- Entdeckung eines **neuen Teilchens** im **Juli 2012**

- Es ist **ein Boson** (Spin 0 oder 2)

- Damals nicht klar: ein Higgs?

- Klar seit **März 2013**

- Ja, es ist **ein Higgs Boson**

- Spin 0 (konsistent mit Higgs)

- Noch nicht klar (wird noch Jahre dauern...)

- Welche Art Higgs Boson?

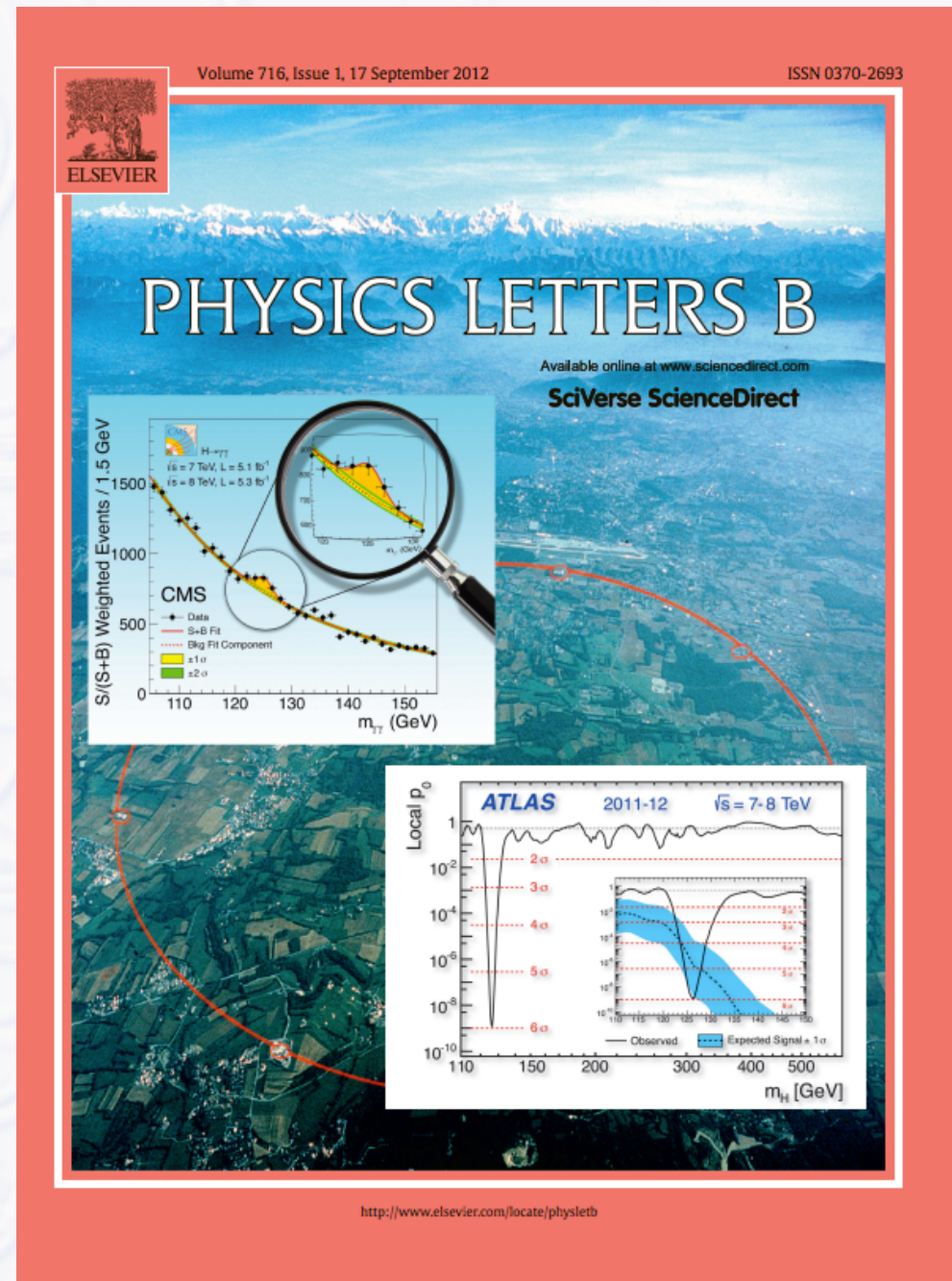
- ein **Standardmodell Higgs**?

- dann gibt es nur ein Higgs Teilchen,  
**DAS "Peter Higgs" Boson**

- ein **SUSY Higgs**?

- dann sollte es mindestens 5 verschiedene Higgs Teilchen geben

vielleicht haben wir gerade nur das erste gefunden und es kommen noch mehr...



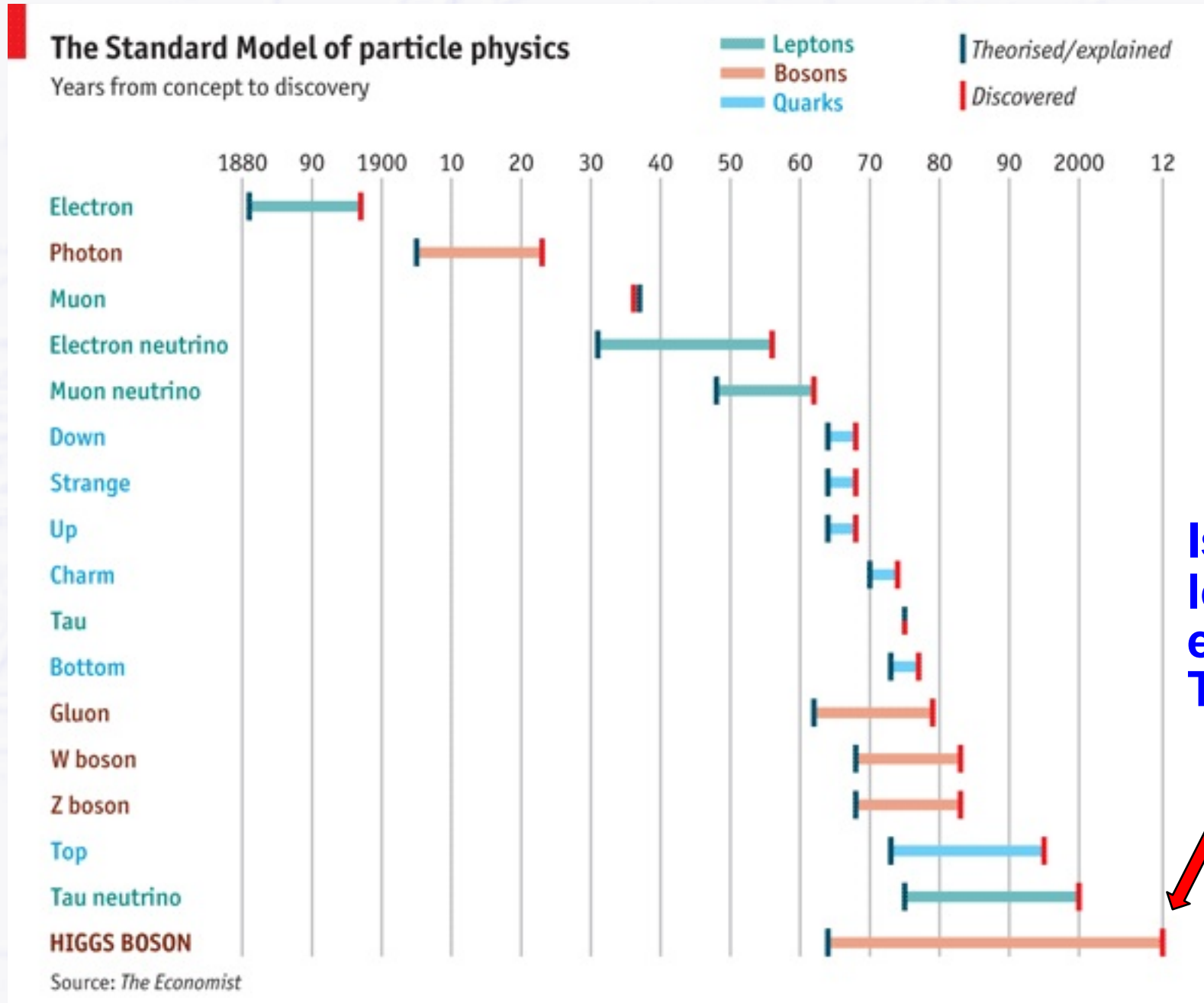
# Nobelpreis für Englert und Higgs 2013

“...for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN’s Large Hadron Collider.”

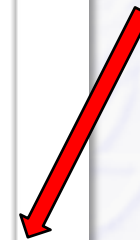




# Standardmodell Teilchenentdeckungen



Ist dies das  
letzte zu  
entdeckende  
Teilchen?



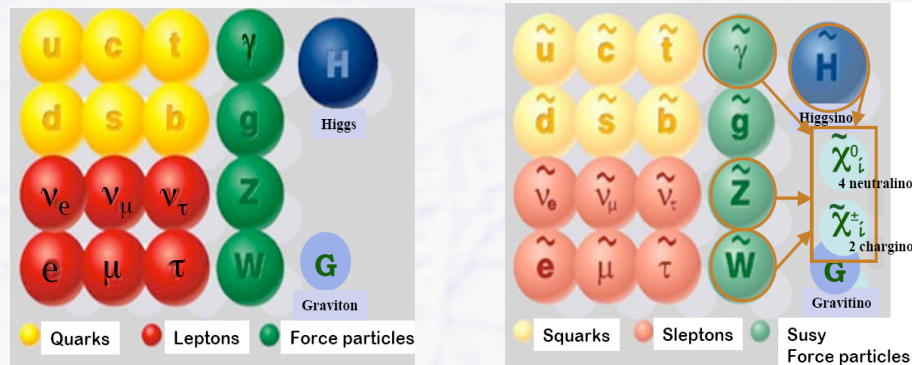
# Jenseits des Standardmodells

## ● Im Standardmodell

- Materieteilchen = Fermionen (Spin ½), Kraftteilchen = Bosonen (Spin 1)
- Warum diese Asymmetrie (Fermionen – Bosonen)?

## ● Erweiterung des Standardmodells durch neue Symmetrie: Supersymmetrie (SUSY)

- SUSY Materieteilchen = Bosonen, SUSY Kraftteilchen = Fermionen
- Verdopplung aller bisherigen Elementarteilchen



Neue Quantenzahl R-parity:  $R_p = (-1)^{B+L+2s} = \begin{matrix} +1 & \text{SM Teilchen} \\ -1 & \text{SUSY Teilchen} \end{matrix}$

**Wenn R-parity erhalten: Leichtestes SUSY Teilchen (LSP) STABIL(!!!)**



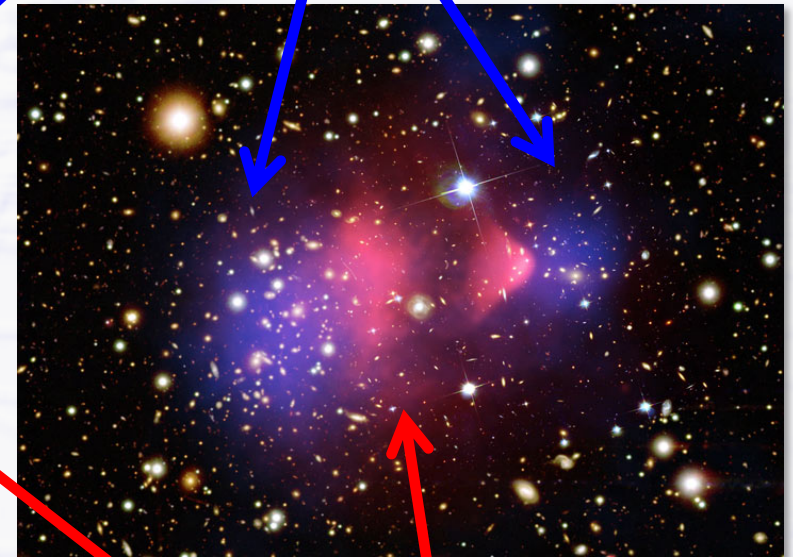
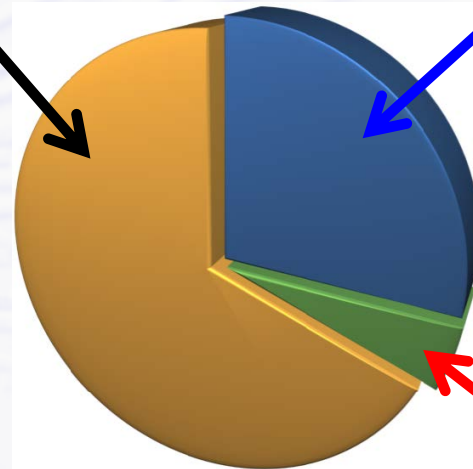
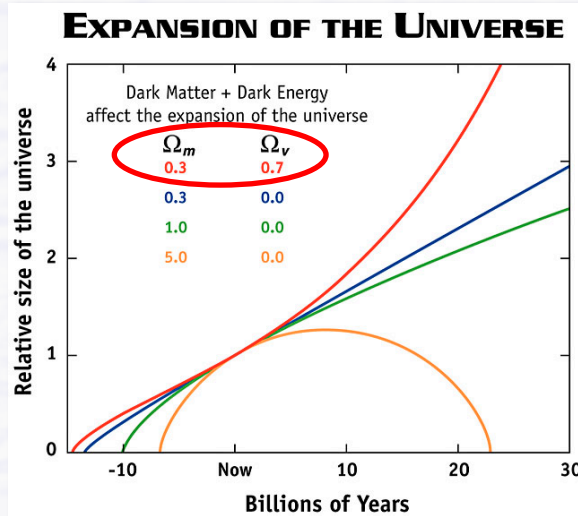
# Bestandteile des Universums

- Parameter basierend auf Daten von Planck + WMAP polarisation + highL + BAO

**Dunkle Energie:**  
 $69.2\% \pm 1.0\%$

**Dunkle Materie:**  
 $25.7\% \pm 0.4\%$

SUSY?  
LHC???



**Gewöhnliche Materie:**  
 $4.82\% \pm 0.05\%$

## ● Abgeleitete Größen

→ **Hubble Konstante:**  $67.80 \pm 0.77 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

→ **Alter des Universums:**  $13.798 \pm 0.037$  Milliarden Jahre

# Konsequenzen für Higgs

- Minimal Supersymmetric Model (MSSM) hat 5 Higgs Teilchen

Teilchen	el. Ladung	Spin/Parität	Masse
$h^0$	0	$0^+$	leicht ( $< 133$ GeV)
$H^0$	0	$0^+$	schwer
$H^+$	+1	$0^+$	schwer
$H^-$	-1	$0^+$	schwer
$A^0$	0	$0^-$	schwer

- Leichtestes MSSM Higgs ( $h^0$ ) ist sehr ähnlich zum Standardmodell Higgs
- Ist das entdeckte Higgs das leichte  $h^0$  im MSSM Modell?

→ wenn ja → es gibt noch mehr Higgse zu entdecken

→ Zerfälle von  $h^0$  und  $H_{SM}$  sind sehr ähnlich, 5-10% Unterschied bei Zerfallswahrscheinlichkeiten

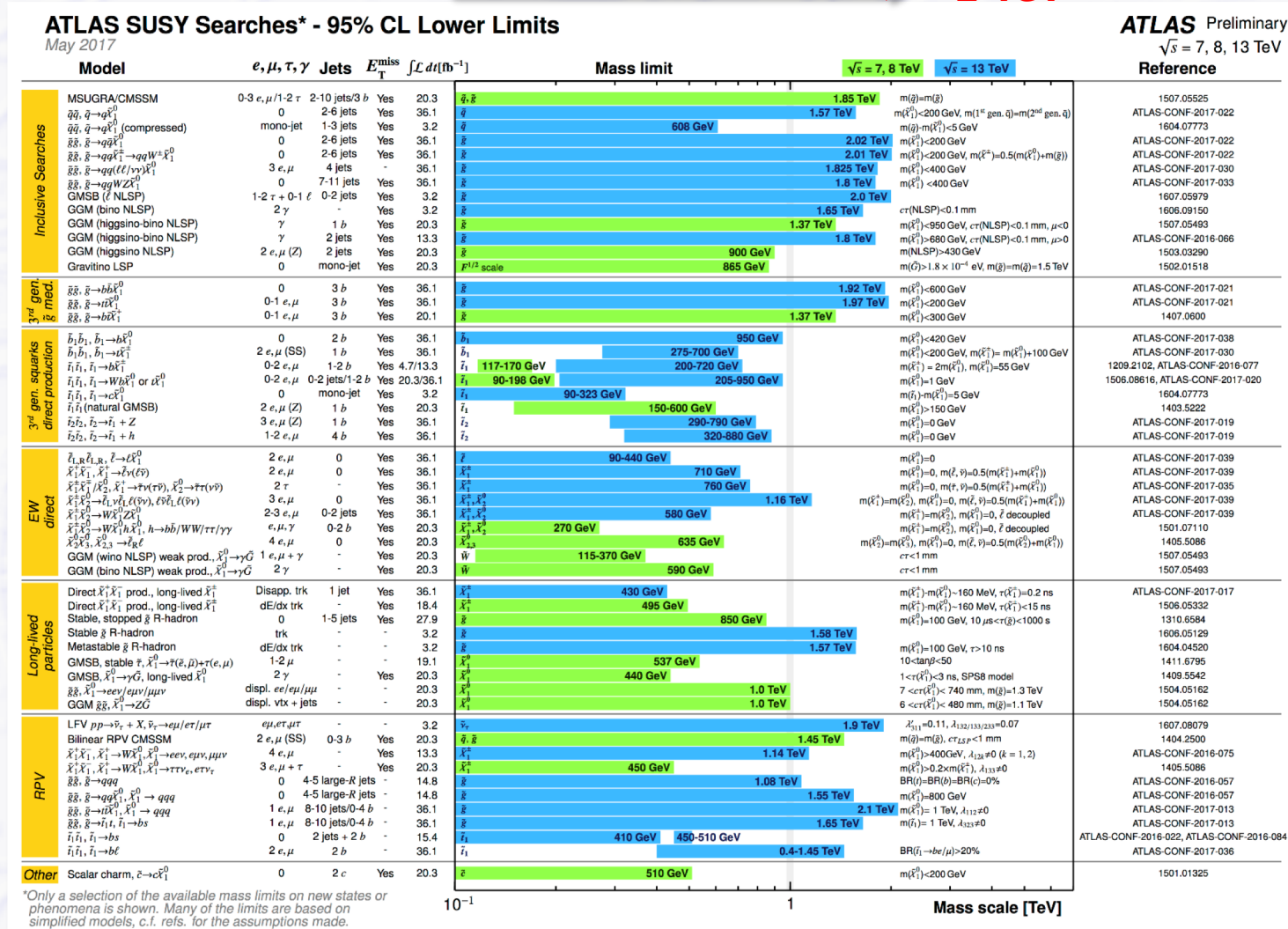
- Zerfallswahrscheinlichkeiten müssen präzise gemessen werden → mehr Daten



# SUSY@LHC?

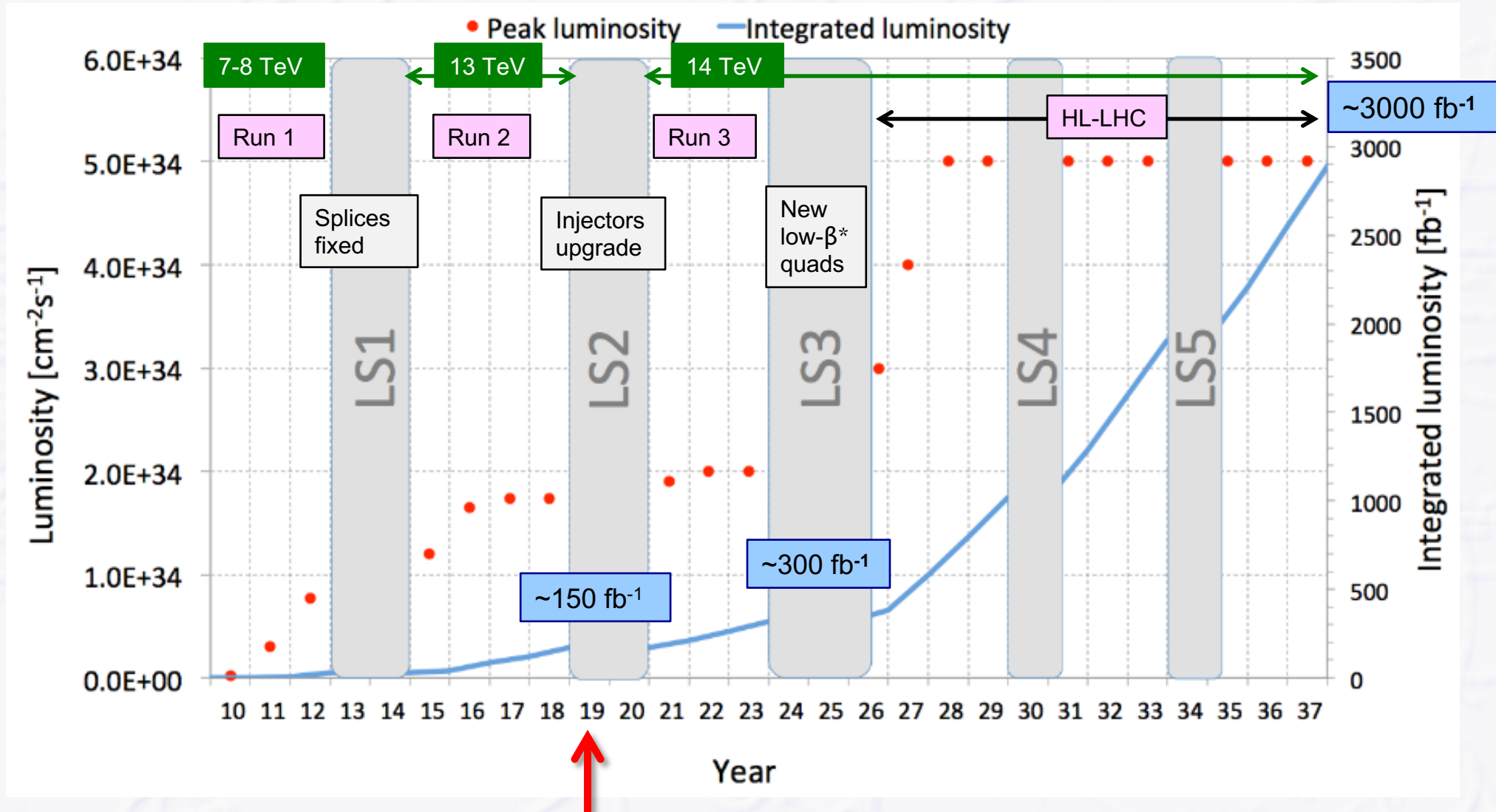
- Bisher leider keine Hinweise... nur sehr viele Ausschlussgrenzen für SUSY-Teilchen mit geringer Masse ( $< \sim 1...2$  TeV)

$> 2$  TeV



# LHC: Wie geht es weiter?

- LHC wird bis ~2037 laufen (ab 2026 mit höherer Luminosität)





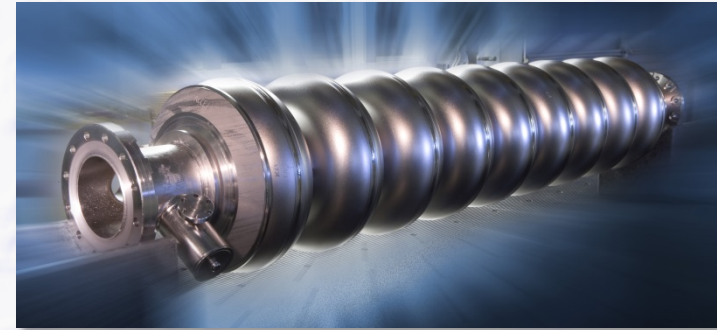
# Zukunft 1a: $e^+e^-$ @ 0.5 TeV →

ILC = International Linear Collider

## ● Elektron-Positron Collider

→ **0.5 – 1 TeV**, 2 x 25 km Länge

- basierend auf supraleitenden Beschleunigungsstrecken (cavities)
- technologisch ausgereift
- 5% “Prototyp” derzeit im Bau (freier Elektronenlaser XFEL am DESY, Hamburg)



## ● “Higgs-Fabrik”

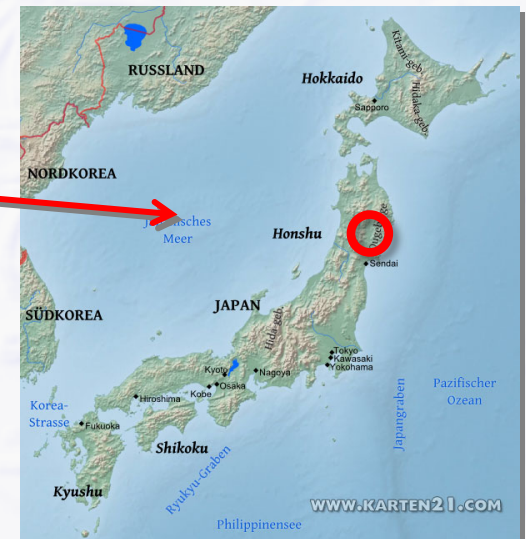
→ Präzisionsmessungen des Higgs (und Top-Quarks)

- Vorteil gegenüber Hadron Collider: nur wenig störender Untergrund anderer Reaktionen

## ● Japan hat Standort angeboten

→ nördlich von Sendai

- derzeit Evaluierung durch japanisches Komitee
- Entscheidung Anfang 2020 erwartet
- danach (bei positiver Entscheidung) Partnersuche
- weltweites Projekt: Japan (50-60%) + europäische + US-Beteiligung



# Zukunft 1b: $e^+e^-$ @ 3 TeV →

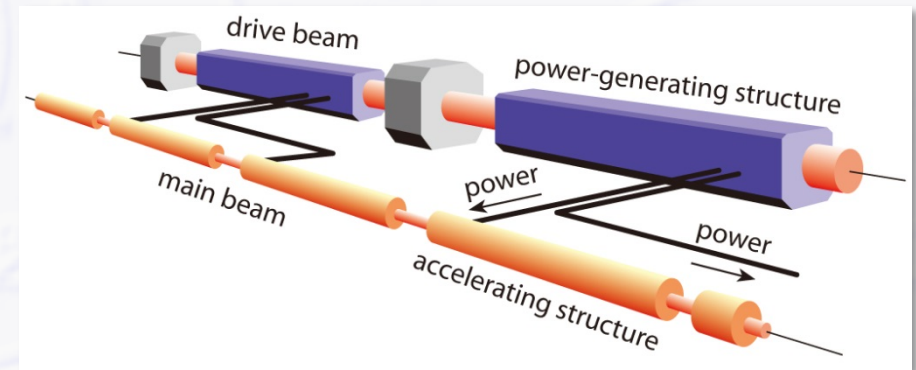


CLIC = Compact Linear Collider

## ● Elektron-Positron Collider

→ **3 TeV**, 2 x 25 km Länge

- basierend auf normalleitenden Beschleunigungsstrecken (cavities)
- 2 Strahlen: “drive beam + main beam”
- Energieübertragung von einem niederenergetischen intensiven Strahl zu einem hochenergetischen zweiten Strahl, technologische Studie bis 2018



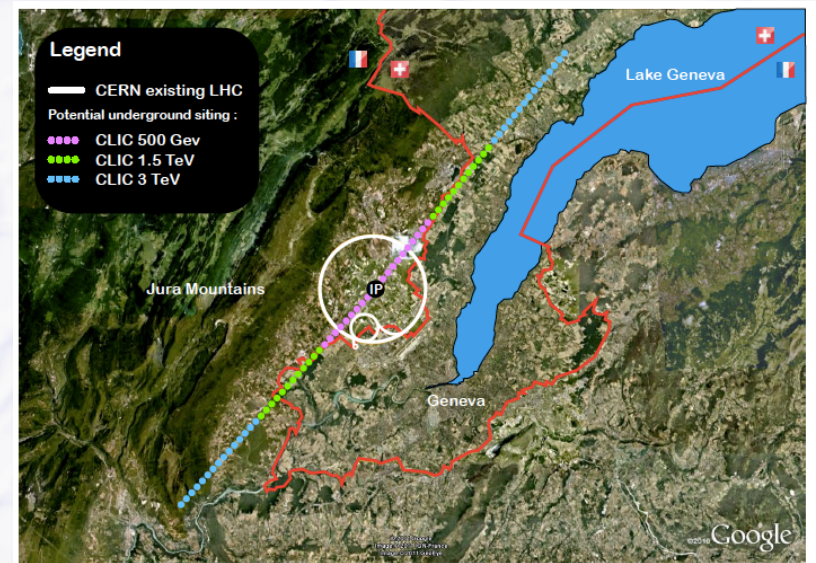
## ● “SUSY-Fabrik”

→ Präzisionsmessungen von SUSY Teilchen

- falls SUSY bei LHC gefunden
- komplementär zu LHC

## ● Möglicher Standort: CERN

- entlang des Jura
- Wechselwirkungspunkt am CERN





# Zukunft 2: neuer pp Collider → FCC

FCC = Future Circular Collider



- Konzeptstudie eines 80-100 km Tunnel in der Region Genf

→ mit Möglichkeiten für  $e^+e^-$  (FCC-ee) und p-e (FCC-he)

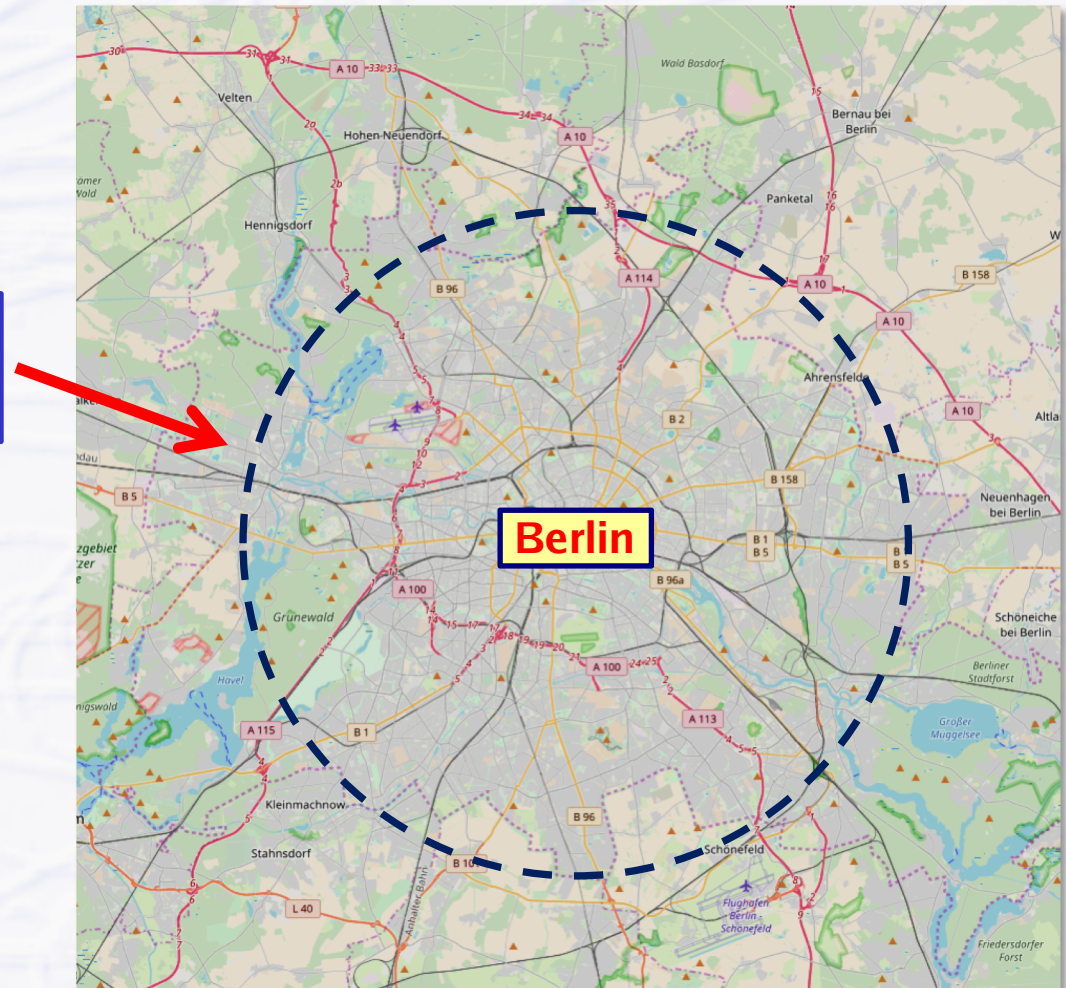
- Studie erstellt Ende 2018

16 T → 100 TeV bei 100 km  
20 T → 100 TeV bei 80 km

Entwicklung neuer supraleitender Magnete nötig (Nb<sub>3</sub>Sn statt NbTi oder Hochtemperatur-Supraleiter)

→ Physikzielsetzung

Erfordert Hinweise von LHC oder anderen Beschleunigern auf neue Phänomene in diesem Energiebereich



# Aussichten

## ● LHC läuft bis 2037

- Run 2 mit 13 TeV abgeschlossen, Run 3 (mit 14 TeV?): 2021-23
- ab 2026 bis ~2037: “high luminosity“ LHC
- ➔ Ziel: **3000 fb<sup>-1</sup> = 100x mehr Daten als Run 1 (Higgs-Entdeckung)**

## ● Nächster Update der European Strategy for Particle Physics bis Mai 2020

### ➔ Input (neben anderem):

- Neue Phänomene bei LHC??? → Bisher keine weitere fundamentale Entdeckung
- ILC (Higgs factory) genehmigt in Japan? → Entscheidung Anfang 2020???
- CLIC (SUSY factory) Technologie Machbarkeit, Kosten(!!)
- FCC Machbarkeit, Kosten(!!!), Physikzielsetzung?

### ➔ Output:

- Welche Richtung soll die (Hochenergie-)Teilchenphysik einschlagen?
- Was wird DAS Zukunftsprojekt des CERN nach LHC Ende ab ~2037?

**Die nächsten Jahrzehnte bleiben spannend...**